

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού  
Περιβάλλοντος**

**Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος**

**«Μελέτη της αεροδυναμικής αγωγιμότητας θερμοκηπιακής  
καλλιέργειας τομάτας.»**

**Πτυχιακή Διατριβή**

**Σπανού Γεωργία**

**Επιβλέπων**

**Καθηγητής Κωνσταντίνος Κίττας**

**Νέα Ιωνία, 2006**





**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 5735/1  
Ημερ. Εισ.: 24-08-2007  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΦΠΑΠ  
2006  
ΣΠΑ

**«Μελέτη της αεροδυναμικής αγωγιμότητας θερμοκηπιακής  
καλλιέργειας τομάτας»**

#### **Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή**

Κ. Κίττας (Επιβλέπων)	Καθηγητής
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας	Γεωργικές Κατασκευές
Μ. Σακελαρίου-Μακραντωνάκη (Μέλος)	Καθηγήτρια
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας	Γεωργική Υδραυλική
Ν.Κατσούλας (Μέλος)	Λέκτορας
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας	Γεωργικές Κατασκευές με έμφαση στο περιβάλλον θερμοκηπίου

**Σπανού Γεωργία**

**«Μελέτη της αεροδυναμικής αγωγιμότητας θερμοκηπιακής  
καλλιέργειας τομάτας»**

LACEC ISBN no:

**Σπανού Γεωργία 2006, « Μελέτη της αεροδυναμικής αγωγιμότητας θερμοκηπιακής καλλιέργειας τομάτας», Πτυχιακή Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Νέα Ιωνία.**

70 Σελίδες, 2 Πίνακες, 21 Σχήματα, 8 Εικόνες, 41 Βιβλιογραφικές παραπομπές.

#### **Περίληψη**

Το αντικείμενο της εργασίας αυτής ήταν ο χαρακτηρισμός της αεροδυναμικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας τομάτας υπό συνθήκες θερμοκηπίου, με τη χρήση τεχνητών φύλλων και η μελέτη της εξάρτησης της από τις εσωτερικές και εξωτερικές κλιματικές συνθήκες. Για τις ανάγκες της εργασίας αυτής και για τον υπολογισμό της αεροδυναμικής αγωγιμότητας, χρησιμοποιήθηκαν τεχνητά φύλλα τα οποία αποτελούνταν από 5 φυλλάκια και τοποθετήθηκαν σε διάφορες θέσεις μέσα στην καλλιέργεια τομάτας προκειμένου να βρεθεί η επίδραση των συστημάτων κλιματισμού στη μεταβολή της αεροδυναμικής αγωγιμότητας των φύλλων. Οι τιμές της αεροδυναμικής αγωγιμότητας που βρέθηκαν συγκρίθηκαν με υπολογισμένες τιμές της αγωγιμότητας σύμφωνα με τις σχέσεις που προτάθηκαν από διάφορους ερευνητές. Παράλληλα μετρηθήκε η διαπνοή της καλλιέργειας με διάταξη λυσιμέτρου, τοποθετημένου στο κέντρο του θερμοκηπίου. Η συσκευή αποτελούνταν από μια ηλεκτρονική ζυγαριά, με δίσκο που περιελάμβανε δύο (2) φυτά. Για τις συνθήκες που επικρατούν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων βρέθηκε να υπάρχει γραμμική συσχέτιση μεταξύ της αεροδυναμικής αγωγιμότητας των φύλλων και της ταχύτητας του ανέμου μέσα και έξω από το θερμοκήπιο. Επίσης, βρέθηκε ότι οι μετρημένες τιμές της αεροδυναμικής αγωγιμότητας, αναλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο θερμοκήπιο προσεγγίζουν αρκετά καλά τις τιμές της αεροδυναμικής αγωγιμότητας η οποία υπολογίστηκε σύμφωνα με τις κλασσικές σχέσεις μετάδοσης θερμότητας. Τέλος, με τη βοήθεια μετρημένων τιμών της αεροδυναμικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας και τις σχέσεις των Penman-Monteith υπολογίστηκε η διαπνοή της καλλιέργειας. Οι υπολογισμένες τιμές της διαπνοής βρέθηκαν να είναι παρομοιές με αυτές που μετρήθηκαν με τη βοήθεια λυσιμέτρου.

### Πρόλογος και Ευχαριστίες

Είναι ίσως δύσκολο να εκφράσει κανείς τις ευχαριστίες του με λίγα λόγια σε ανθρώπους που τον βοήθησαν, τον παρότρυναν και του συμπαραστάθηκαν κατά τη διάρκεια της υλοποίησης της πτυχιακής διατριβής.

Πρώτα από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του Τμήματος Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος και Διευθυντή του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας κ. Κωνσταντίνο Κίττα για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με το παρόν θέμα, αλλά και για την επιστημονική και ηθική υποστήριξη του καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στην κ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη Μαρία Καθηγήτρια του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για την συμμετοχή της στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή, την κριτική ανάγνωση του κειμένου και τις πολύτιμες υποδείξεις και επισημάνσεις, οι οποίες συνέβαλαν σημαντικά στη βελτίωση και την τελική διαμόρφωση της πτυχιακής διατριβής.

Θερμά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Νικόλαο Κατσούλα, Λέκτορα του Τμήματος Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας τόσο για την συμμετοχή του στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή όσο για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε κατά το πειραματικό στάδιο, τη συγγραφή και ολοκλήρωση αυτής της διατριβής. Επίσης θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την συμβολή του στην γενικότερη επιστημονική μου κατάρτιση και για την υπομονή του και επίμονη που έδειξε με τα προβλήματα που εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια της συγγραφής της πτυχιακής μου διατριβής.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την ηθική και υλική υποστήριξη τους, την αγάπη, και τη συνεχή εμπύχωση και πίστη τους σε εμένα χωρίς την οποία η εργασία αυτή δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί.



*Στους γονείς μου*

## Πίνακας Περιεχομένων

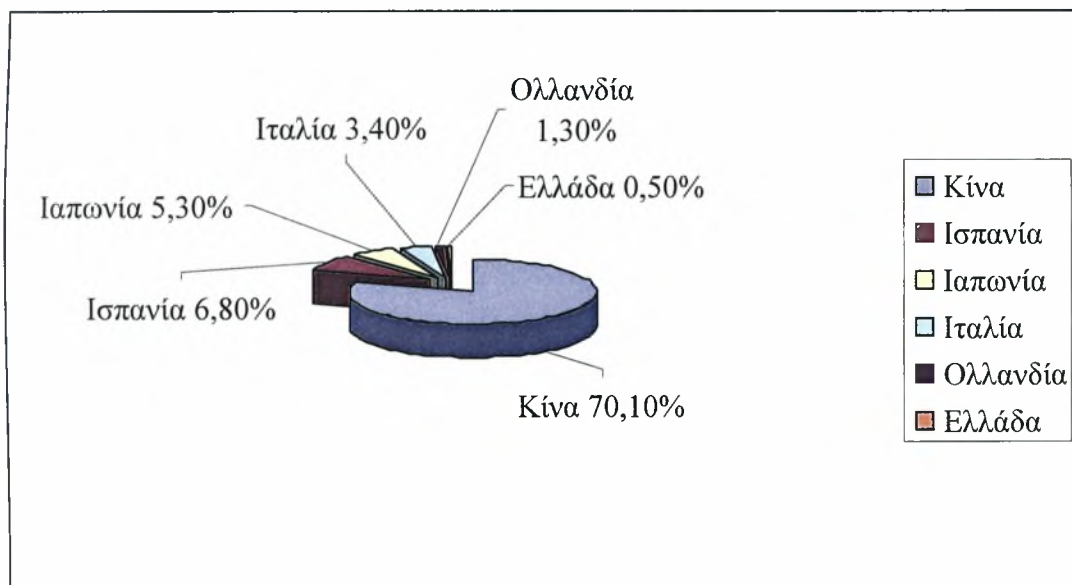
<b>Κεφάλαιο 1</b>	<b>Εισαγωγή .....</b>	<b>10</b>
1.1	Ο κλάδος των θερμοκηπίων στην Ελλάδα.....	11
1.2	Προβλήματα των θερμοκηπίων .....	13
1.3	Κλιματισμός των θερμοκηπίων .....	14
1.3.1	Θέρμανση των θερμοκηπίων .....	14
1.3.2	Ψύξη των θερμοκηπίων .....	16
1.3.2.1	Σύστημα αερισμού .....	16
1.3.2.2	Σύστημα σκίασης.....	18
1.3.2.3	Συστήματα δροσισμού .....	20
1.4	Σκοπός της εργασίας.....	22
<b>Κεφάλαιο 2</b>	<b>Θεωρητική ανάλυση .....</b>	<b>23</b>
2.1	Το ενεργειακό ισοζύγιο στο θερμοκήπιο.....	24
2.2	Επίδραση των συστημάτων ελέγχου στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου και την καλλιέργεια .....	27
2.2.1	Επίδραση συστήματος θέρμανσης.....	27
2.2.2	Επίδραση συστήματος αερισμού .....	28
2.2.3	Επίδραση συστήματος σκίασης .....	29
2.2.4	Επίδραση συστήματος δροσισμού .....	30
2.3	Διαπνοή .....	30
2.3.1	Η εξίσωση των Penman-Monteith .....	32
2.4	Στοματική αγωγιμότητα .....	35
2.5	Αεροδυναμική αγωγιμότητα .....	36
2.6	Σύζευξη καλλιέργειας με τον περιβάλλοντα αέρα-παράγοντας $\Omega$ .....	37
<b>Κεφάλαιο 3</b>	<b>Υλικά και Μέθοδοι .....</b>	<b>39</b>
3.1	Το θερμοκήπιο.....	40
3.2	Η καλλιέργεια .....	42
3.3	Το τεχνητό φύλλο .....	43
3.4	Μετρήσεις.....	45
<b>Κεφάλαιο 4</b>	<b>Αποτελέσματα και Συζήτηση.....</b>	<b>48</b>
4.1	Συσχέτιση της ταχύτητας του ανέμου μέσα και έξω από το θερμοκήπιο . .....	49
4.2	Πορεία της ταχύτητας του ανέμου κατά τη διάρκεια της ημέρας.....	51
4.3	Αεροδυναμική αγωγιμότητα των φύλλων .....	53
4.4	Συσχέτιση της αεροδυναμικής αγωγιμότητας με την ταχύτητα του ανέμου .....	54

4.5	Σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της αεροδυναμικής αγωγιμότητας των φύλλων .....	56
4.6	Σύγκριση μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της διαπνοής κατά τη διάρκεια της ημέρας.....	60
Κεφάλαιο 5	Συμπεράσματα.....	63
	Συμπεράσματα.....	64
	Βιβλιογραφία .....	65

## **Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή**

## 1.1 Ο κλάδος των θερμοκηπίων στην Ελλάδα

Οι απαιτήσεις για παραγωγή φρέσκων λαχανικών και ανθέων κατά τη διάρκεια όλου του έτους έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση του ενδιαφέροντος για καλλιέργειες υπό κάλυψη. Οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες αποτελούν την πιο δυναμική μορφή της πρωτογενούς παραγωγής. Το 2001 η παγκόσμια έκταση των θερμοκηπίων ήταν 8.500.000 στρέμματα. Από τα αυτά τα 6.000.000 στρ. ή το 70.1% ήταν στην Κίνα, τα 575.000 στρ. ή το 6.8% ήταν στην Ισπανία, τα 450.000 στρ. ή το 5.3% ήταν στην Ιαπωνία, τα 285.000 στρ. ή το 3.4% ήταν στην Ιταλία, τα 110.000 στρ. ή το 1.3% στην Ολλανδία ενώ η Ελλάδα κατέχει μόλις το 0.5% της παγκόσμιας έκτασης.



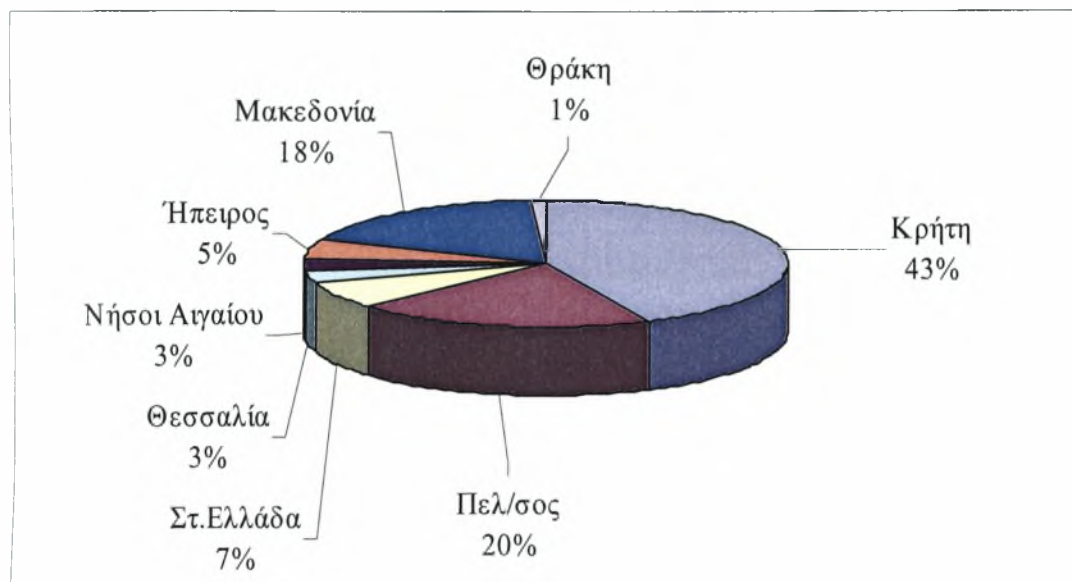
*Σχήμα 1.1 Παγκόσμια κατανομή θερμοκηπίων το 2001 (Πηγή: ICAP)*

Στην Ελλάδα οι πρώτες συστηματικές εγκαταστάσεις θερμοκηπίων ξεκίνησαν το 1955 και εξαπλώθηκαν ραγδαία μετά το 1961, με τη χρήση του πολυαιθυλενίου ως υλικού κάλυψης, φτάνοντας τα 49.000 στρέμματα το 2004. Το 65% των θερμοκηπίων αυτών είναι συγκεντρωμένα στην Κρήτη, στη Πελοπόννησο και στα νησιά του νοτίου Αιγαίου, δηλαδή σε περιοχές χωρίς χαμηλές θερμοκρασίες και έντονη ηλιοφάνεια.

Η γεωγραφική κατανομή των θερμοκηπίων στην Ελλάδα ακολουθεί κατά κανόνα την κλιματική διαφοροποίηση των επί μέρους περιοχών. Περισσότερες εκτάσεις θερμοκηπίων συναντώνται στις πλέον ευνοϊκές από πλευράς κλίματος (ήπιοι



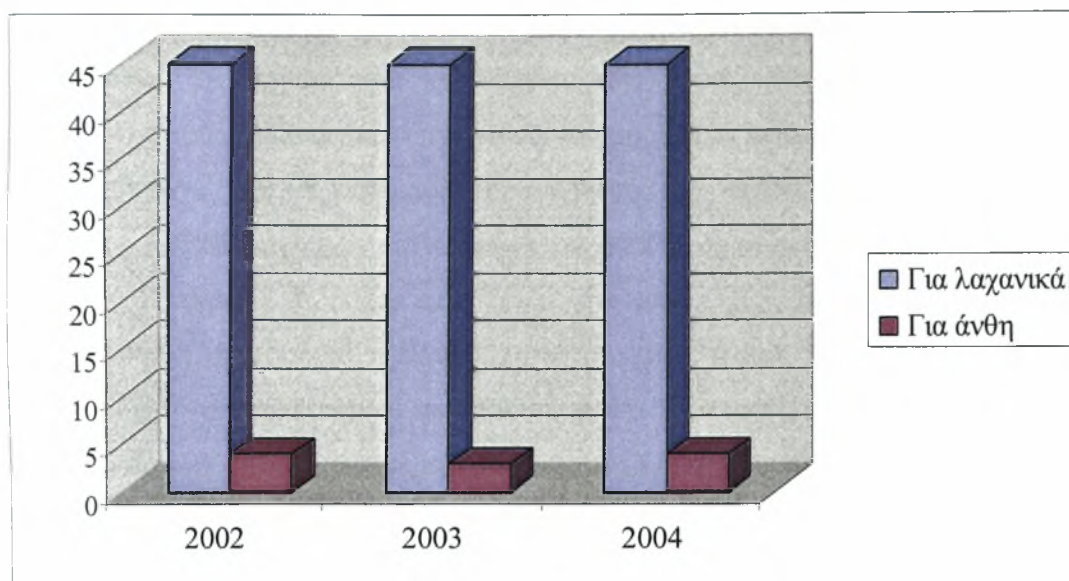
χειμώνες, απουσία παγετών κ.λπ.) περιοχές. Τα τελευταία όμως χρόνια, τα διαρθρωτικά προβλήματα της ελληνικής γεωργίας ώθησαν αρκετούς αγρότες από άλλες περιοχές της Ελλάδος (π.χ. Θεσσαλία) στις θερμοκηπιακές καλλιέργειες, αυξάνοντας έτσι το ποσοστό των θερμοκηπιακών εκτάσεων.



*Σχήμα 1.2 Γεωγραφική κατανομή των θερμοκηπίων το 1999 (Πηγή: Υπουργείο Γεωργίας)*

Τα κυριότερα είδη που καλλιεργούνται στο θερμοκήπιο είναι η τομάτα και το αγγούρι από τα λαχανοκομικά, τα γαστρικά φυτά, τα γαρίφαλα και τα τριαντάφυλλα από τα ανθοκομικά. Η μέση στρεμματική απόδοση των θερμοκηπιακών καλλιεργειών είναι σαφώς μεγαλύτερη από την απόδοση της υπαίθριας παραγωγής.

Παρόλο που ο μεγαλύτερος όγκος των θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων στην Ελλάδα δε βρίσκεται τεχνολογικά σε υψηλό επίπεδο, η περαιτέρω ανάπτυξη των θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων μπορεί να συγκρατήσει τον πληθυσμό στην ύπαιθρο, να μειώσει την ανεργία και να δώσει λύσεις στα διορθωτικά προβλήματα της ελληνικής γεωργίας.



*Σχήμα 1.3 Εκτάσεις που καλλιεργούνται με λαχανοκομικές και ανθοκομικές καλλιέργειες στην Ελλάδα κατά τη περίοδο 2002-2004. (Πηγή Υπουργείο Γεωργίας)*

## 1.2 Προβλήματα των θερμοκηπίων

Η μη ικανοποιητική ρύθμιση του μικροκλίματος των θερμοκηπίων είναι πρόβλημα που αντιμετωπίζουν όλες οι περιοχές της Ελλάδας, ενώ το υψηλό κόστος για τη θέρμανση και κατασκευή των θερμοκηπίων είναι πρόβλημα που αντιμετωπίζουν κυρίως όλες οι άλλες περιοχές εκτός από την Κρήτη.

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα των θερμοκηπιακών καλλιεργειών είναι η μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας εντός του θερμοκηπίου σε συνδυασμό με τη χαμηλή υγρασία, συνθήκες που εμφανίζονται κατά τη θερμή περίοδο του έτους και κάνουν απαγορευτική τη συνέχιση της καλλιέργειας στο θερμοκήπιο ή όταν συνεχίζεται δεν επικρατούν ευνοϊκές συνθήκες. Έτσι το σημαντικότερο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου είναι η υδατική και θερμική καταπόνηση. Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι για την παραγωγή ποιοτικών προϊόντων, είναι απαραίτητος ένας καλός κλιματισμός κατά τη θερινή περίοδο. Αντίθετα, οι χαμηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια του χειμώνα είναι οικονομικό πρόβλημα και μπορεί να λυθεί με τη θέρμανση του θερμοκηπίου.

Επίσης ένα άλλο πρόβλημα είναι η ρύθμιση της σχετικής υγρασίας του αέρα των θερμοκηπίων. Τα σοβαρότερα προβλήματα που σχετίζονται με τη ρύθμιση της σχετικής υγρασίας στα θερμοκήπια είναι, το χειμώνα η μείωση του ποσοστού της κάτω από 90% και το καλοκαίρι η ανύψωση του ποσοστού σύμφωνα με τις απαιτήσεις των καλλιεργειών και πάντως κατά κανόνα σε επίπεδα πάνω από 50-60%.

Η σχετική υγρασία του αέρα στο θερμοκήπιο πέφτει κάτω από τα επιθυμητά όρια, όταν ανυψωθεί υπερβολικά η θερμοκρασία του αέρα ή όταν είναι πολύ χαμηλή η περιεκτικότητα του εξωτερικού περιβάλλοντος σε υδρατμούς. Συνήθως όμως, λόγω της διαπνοής των φυτών ο αέρας που υπάρχει μέσα στο θερμοκήπιο περιέχει επαρκείς ποσότητες υδρατμούς. Το πρόβλημα, επομένως, δημιουργείται κυρίως από την άνοδο της θερμοκρασίας, η οποία όπως είναι γνωστό ελαττώνει σημαντικά την σχετική υγρασία ακόμη και αν η περιεκτικότητα του αέρα σε υδρατμούς δεν μεταβάλλεται.

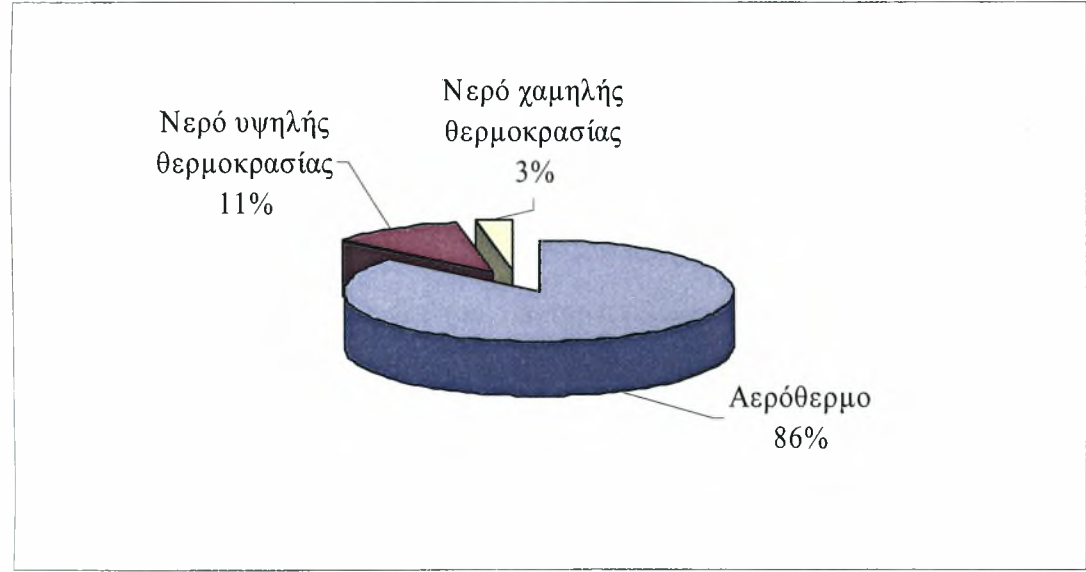
### **1.3 Κλιματισμός των θερμοκηπίων**

#### **1.3.1 Θέρμανση των θερμοκηπίων**

Η κύρια πηγή ενέργειας για τη θέρμανση του χώρου του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι η ηλιακή ακτινοβολία. Όταν όμως η πηγή αυτή είναι περιορισμένη ή λείπει τελείως (κατά τη διάρκεια της νύχτας) και η θερμοκρασία πέσει κάτω από τα επιθυμητά επίπεδα, χρησιμοποιείται το σύστημα θέρμανσης.

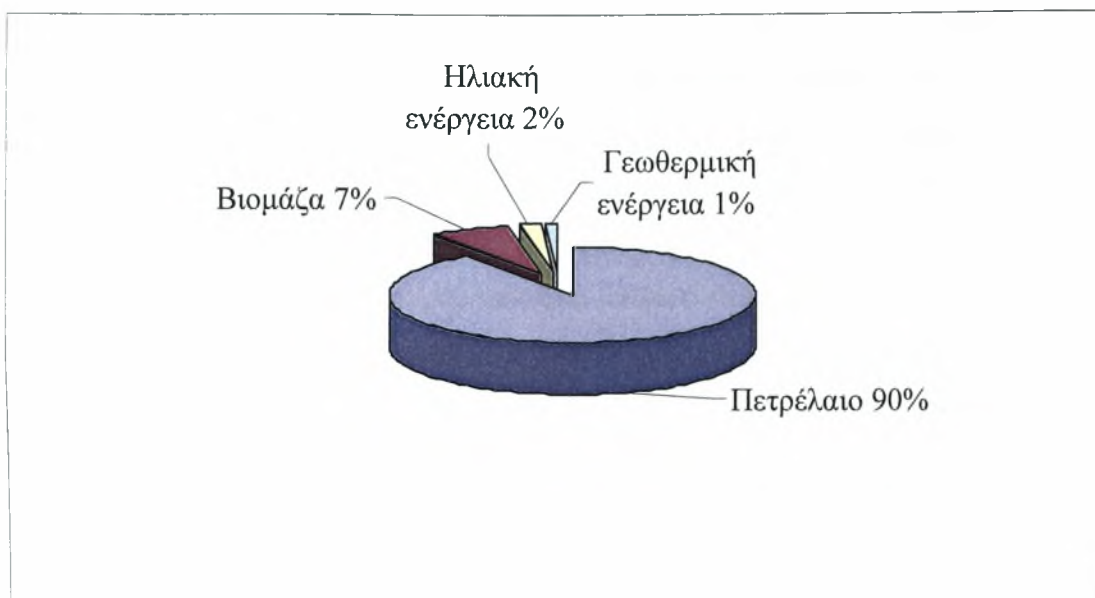
Η χρήση των συστημάτων θέρμανσης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της υγρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Αυτό είναι σημαντικό γιατί τα υψηλά επίπεδα υγρασίας επηρεάζουν την απόδοση των καλλιεργειών και συνδέονται άμεσα με την εμφάνιση μυκητολογικών ασθενειών. Μειώνουν, επίσης, κατά πολύ το ρυθμό διαπνοής της καλλιέργειας και ειδικότερα στην καλλιέργεια της τομάτας προκαλούν σοβαρές απώλειες της παραγωγής. Επομένως με τη λειτουργία των συστημάτων θέρμανσης, κυρίως κατά τη διάρκεια της νύχτας, ο ρυθμός της διαπνοής της καλλιέργειας είναι μεγαλύτερος. Βασική λειτουργία ενός συστήματος θέρμανσης

είναι να διατηρεί τη θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα στα επιθυμητά επίπεδα και να μειώνει την υγρασία του. Εκτός από τη θέρμανση του αέρα είναι σημαντικό η θερμοκρασία της καλλιέργειας να είναι κοντά στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα. Οι ανάγκες, σε ημερήσια θέρμανση είναι πολύ πιο μικρές από τις αντίστοιχες νυκτερινές (κατά τον Γερμανό Vickermann το ημερήσιο κόστος θέρμανσης αντιπροσωπεύει το 10-25% της ολικής δαπάνης θέρμανσης ). Τα πλέον διαδεδομένα συστήματα θέρμανσης για εμπορικά και πειραματικά θερμοκήπια είναι οι επιδαπέδιοι σωλήνες ή ο συνδυασμός τους με αερόθερμα. Από τα θερμαινόμενα θερμοκήπια στο 86% χρησιμοποιείται για την κατανομή της θερμοκρασίας το αερόθερμο, στο 11% χρησιμοποιείται το κεντρικό σύστημα θέρμανσης με νερό 85 °C (νερό υψηλής θερμοκρασίας) που κυκλοφορεί σε μεταλλικούς σωλήνες και στο 3% χρησιμοποιείται το κεντρικό σύστημα θέρμανσης με ζεστό νερό 45 °C (νερό χαμηλής θερμοκρασίας) που κυκλοφορεί σε πλαστικούς σωλήνες (Σχήμα 1.4)



**Σχήμα 1.4** Ποσοστιαία σχηματική παράσταση των διαφόρων συστημάτων θέρμανσης που χρησιμοποιούνται στα θερμοκήπια. (Υπουργείο Γεωργίας 1998)

Για την θέρμανση των θερμοκηπίων έχουν χρησιμοποιηθεί εκτός από το πετρέλαιο και άλλες εναλλακτικές πηγές ενέργειας, όπως η βιομάζα, η ηλιακή ενέργεια και η γεωθερμική ενέργεια. Στο σχήμα 1.5 φαίνεται το ποσοστό χρήσης των πηγών ενέργειας, από τις οποίες το πετρέλαιο είναι η πιο διαδεδομένη πηγή με ποσοστό 90%.



**Σχήμα 1.5** Μορφές ενέργειας που χρησιμοποιούνται για την θέρμανση των θερμοκηπίων. (Υπουργείο Γεωργίας 1998)

### 1.3.2 Ψύξη των θερμοκηπίων

Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στα μεσογειακά θερμοκήπια για τη μείωση της θερμοκρασίας είναι τα συστήματα αερισμού, τα συστήματα σκίασης και τα συστήματα δροσίσου. Παρακάτω περιγράφονται τα διάφορα συστήματα ψύξης των θερμοκηπίων.

#### 1.3.2.1 Σύστημα αερισμού

Σε χώρες με θερμό καλοκαίρι ο αποτελεσματικός αερισμός των θερμοκηπίων είναι προϋπόθεση για τον έλεγχο του θερμοκηπιακού μικροκλίματος. Ο ανεπαρκής αερισμός ή/και ο ανεπαρκής χειρισμός του οδηγούν σε ακατάλληλες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας. Βασικός στόχος της λειτουργίας των συστημάτων



αερισμού είναι η μείωση της υψηλής θερμοκρασίας, που επικρατεί στο εσωτερικό του θερμοκηπίου λόγω της προσθήκης ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία.

Η κυριότερη και πιο φθηνή μέθοδος αερισμού που χρησιμοποιείται στα θερμοκήπια, προκείμενου να αποφευχθεί η υπερθέρμανση τους, είναι ο φυσικός αερισμός ο οποίος προκαλείται από τη διαφορά πίεσης στα ανοίγματα αερισμού. Η κίνηση του αέρα σε ένα θερμοκήπιο το οποίο διαθέτει ανοίγματα οροφής και πλαϊνά η ροή αέρα μέσω ενός ανοίγματος προκαλείται από τον συνδυασμό των διαφορών πίεσης που δημιουργούνται α) λόγω των δυνάμεων άνωσης που οφείλονται σε διαφορές θερμοκρασίας (φαινόμενο καμινάδας) και β) λόγω της ταχύτητας του ανέμου. Η κίνηση του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο χαρακτηρίζεται από το ρυθμό (N) ωριαίας ανανέωσης, δηλαδή πόσες φορές ανανεώνεται ο αέρας του θερμοκηπίου σε μια ώρα ( $h^{-1}$ ) (Κίττας 2000). Με τη μέθοδο αυτή όμως υπάρχει περιορισμένη δυνατότητα μείωσης της θερμοκρασίας τόσο σε ένταση όσο και σε χρονική διάρκεια. Λαμβάνοντας υπόψη τις κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στη μεσογειακή λεκάνη, φαίνεται πως η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι τα μέσα της άνοιξης (Κίττας κ. άλλοι 1997).

Εκτός από το φυσικό αερισμό, έκτοτε χρησιμοποιείται και ο δυναμικός αερισμός ο οποίος γίνεται με τη χρήση ανεμιστήρων. Δύο είναι τα συστήματα δυναμικού εξαερισμού που έχουν βρει εφαρμογή στα θερμοκήπια: α) Το πρώτο είναι το σύστημα υποπίεσης στο οποίο ο ανεμιστήρας τοποθετείται συνήθως στη μικρή πλαϊνή πλευρά και καθώς εξάγει από το θερμοκήπιο αέρα, δημιουργεί υποπίεση οπότε ο εξωτερικός αέρας αναγκάζεται να μπει από τα ανοίγματα που βρίσκονται στην αντικρινή πλευρά. Το σύστημα αυτό μπορεί εύκολα να συνδυαστεί με εξάτμιση νερού που προκύπτει από τη διέλευση του αέρα μέσω υγρού παραπετάσματος η οποία προκαλεί ψύξη του θερμοκηπίου.

β) Το δεύτερο σύστημα δυναμικού αερισμού των θερμοκηπίων είναι το σύστημα υπερπίεσης. Σύμφωνα με αυτό, ο αέρας του περιβάλλοντος εισάγεται με πίεση μέσα στο θερμοκήπιο, οπότε ο θερμότερος και υγρότερος αέρας του θερμοκηπίου βγαίνει από ειδικά ανοίγματα. Το σύστημα αυτό μπορεί να συνδυαστεί με ύγρανση, θέρμανση, ψύξη ή και φιλτράρισμα του αέρα που μπαίνει στο θερμοκήπιο.

Το κυριότερο μειονέκτημα του δυναμικού αερισμού όταν συγκρίνεται με το φυσικό, είναι το υψηλό κόστος λειτουργίας και οι διαβαθμίσεις της θερμοκρασίας και υγρασίας κατά μήκος της πορείας του αέρα από την είσοδο προς την έξοδο του από

το θερμοκήπιο. Το πλεονέκτημα του δυναμικού αερισμού είναι ότι μπορούμε να επιτύχουμε ρυθμούς ανανέωσης αέρα πάνω από  $50 \text{ h}^{-1}$  (Κίττας κ. άλλοι 1999) κάτι που είναι αδύνατο με το φυσικό αερισμό. Επίσης μπορεί να συνδυαστεί με συστήματα υγρής παρειάς.

Η ροή του αέρα επιδρά άμεσα τόσο στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου, μεταβάλλοντας τη θερμοκρασία, το έλλειμμα κορεσμού και τη συγκέντρωση του  $\text{CO}_2$  στον αέρα, όσο και στην καλλιέργεια όσον αφορά την επίδραση στην αεροδυναμική αγωγιμότητα, αλλά και άμεσα στις υπόλοιπες μεταβλητές και τις φυσιολογικές της λειτουργίες (θερμοκρασία, έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα, στοματική αγωγιμότητα, διαπνοή).

#### **1.3.2.2 Σύστημα σκίασης**

Η σκίαση του θερμοκηπίου επιτυγχάνεται είτε με κουρτίνες (ή δίχτυα) σκίασης είτε με βάψιμο του υλικού κάλυψης του θερμοκηπίου με ασβέστη, στόκο, ή άλλα ειδικά υλικά τα οποία ελαττώνουν την περατότητά τους στην ηλιακή ακτινοβολία κατά 50-60%. Το βάψιμο με τα υλικά αυτά γίνεται στα τέλη της Άνοιξης ή τις αρχές του καλοκαιριού. Τα υλικά αυτά θα πρέπει να είναι επαρκώς υδατοδιαλυτά ώστε να ξεπλένονται με τις επανειλημμένες βροχές του φθινοπώρου.

Η σκίαση αναφέρεται ως η έσχατη λύση για τον έλεγχο του κλίματος του θερμοκηπίου, λόγω της επίδρασης της στην παραγωγή εξαιτίας της μείωσης της διαπερατότητας του θερμοκηπίου στην ηλιακή ακτινοβολία. Διακρίνουμε δυο κύριους τύπους σκιάσεως:

α) *τη διαρκή σκίαση*. Περιλαμβάνει την λεύκανση των τοιχωμάτων ή την τοποθέτηση μόνιμων σκιάστρων σε σταθερή θέση.

β) *την προσωρινή σκίαση*. Γίνεται με ένα ύφασμα-κουρτίνα το οποίο ξεδιπλώνεται είτε με το χέρι είτε αυτόματα, όταν η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία είναι πολύ υψηλή.

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος που εφαρμόζεται από τους παραγωγούς λόγω της απλότητας της και του χαμηλού κόστους εφαρμογής, είναι η λεύκανση του θερμοκηπίου. Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται μείωση της εισερχόμενης

ακτινοβολίας στο θερμοκήπιο, κάτι το οποίο προκαλεί άμεσα μείωση της θερμοκρασίας του αέρα και της καλλιέργειας λόγω μείωσης της διαθέσιμης ενέργειας και μεταβολής της στοματικής αγωγιμότητας.

Ένα πλεονέκτημα της λεύκανσης έναντι των άλλων τεχνικών σκίασης είναι ότι δεν επηρεάζει τον αερισμό του θερμοκηπίου, ενώ οι εσωτερικά ή εξωτερικά τοποθετημένες κουρτίνες σκίασης επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση του αερισμού (Montero and Anton 1992). Επίσης η λεύκανση αυξάνει σημαντικά το ποσοστό της διάχυτης ακτινοβολίας στο θερμοκήπιο, κάτι το οποίο είναι γνωστό πως αυξάνει την αποτελεσματικότητα χρήσης της ακτινοβολίας (Alados and Alados-Arboledas 1993). Η αποδοτικότητα της μεθόδου στη μείωση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου είναι ικανοποιητική, αφού η θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου πλησιάζει στα επίπεδα της εξωτερικής θερμοκρασίας.

Παρά την ευρεία εφαρμογή της μεθόδου του ασπρίσματος της οροφής για την ανακούφιση του θερμοκηπίου από τα μεγάλα φορτία ακτινοβολίας, η βιβλιογραφία που σχετίζεται με την επίδραση της εφαρμογής της τεχνικής αυτής στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου και την καλλιέργεια είναι ελάχιστη. Σε μια έρευνα οι Kittas et al. (1999a) παρατήρησαν ότι, όταν εφαρμόστηκε άσπρισμα της οροφής σε γυάλινο θερμοκήπιο, αυξήθηκε ελαφρά το ποσοστό της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας και μειώθηκε το ποσοστό της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εισέρχονταν στο θερμοκήπιο, αναφέροντας ότι το χαρακτηριστικό αυτό του ασπρίσματος μπορεί να αποτελέσει ένα πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής έναντι των άλλων τεχνικών σκίασης, ειδικά στις θερμές χώρες με υψηλά φορτία ακτινοβολίας κατά την καλοκαιρινή περίοδο.

Εκτός από τη λεύκανση χρησιμοποιούνται και διάφορα σκιάστρα τα οποία τοποθετούνται μόνιμα στο θερμοκήπιο. Την τελευταία δεκαετία εμφανίστηκε στο εμπόριο μεγάλος αριθμός υφασμάτων (από ακρυλικό, πολυπροπυλένιο, πολυεστέρας, πολυαμίδιο κ.α.) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σκιάστρα. Διαθέτουν μεγάλη ποικιλία αεροπερατότητα και διαπερατότητα στην ηλιακή ακτινοβολία. Σήμερα υπάρχουν σκιάστρα με λεπτό στρώμα αλουμινίου, που ανακλούν μεγάλο μέρος της ακτινοβολίας στο εξωτερικό περιβάλλον και τα οποία μπορούν ακόμα να χρησιμοποιηθούν ως θερμομονωτικές κουρτίνες για την μείωση της κατανάλωσης καύσιμων για θέρμανση τον χειμώνα (Κίττας κ. άλλοι 1999).

### 1.3.2.3 Συστήματα δροσισμού

Η μέθοδος δροσισμού είναι η αποτελεσματικότερη από τις μεθόδους που έχουν αναφερθεί διότι έχει τα καλύτερα αποτελέσματα στην μείωση της θερμοκρασίας και δεν επηρεάζει την εισερχόμενη ακτινοβολία και κατ'επέκταση την φωτοσύνθεση. Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται είναι τα εξής:

#### α) Σύστημα με ανεμιστήρες και υγρή παρειά

Στο σύστημα αυτό έχουμε συνδυασμό δυναμικού αερισμού (ανεμιστήρες) και υγρής παρειάς προκειμένου να πετύχουμε μείωση της θερμοκρασίας και αύξησης της υγρασίας. Η αρχή αυτού του συστήματος βασίζεται στην ψύξη λόγω κορεσμού σε υγρασία του εξωτερικού αέρα που εισέρχεται στο θερμοκήπιο. Οι ανεμιστήρες τοποθετούνται απέναντι από την πλευρά του θερμοκηπίου με την υγρή παρειά και απορροφούν τον αέρα από το εσωτερικό του θερμοκηπίου, αναγκάζοντας τον εξωτερικό αέρα να εισέλθει στο θερμοκήπιο μέσα από το τοίχωμα της υγρής παρειάς. Καθώς ο αέρας διέρχεται με χαμηλή ταχύτητα μέσα από την παρειά, ένα μέρος της θερμότητας του αέρα χρησιμοποιείται για την εξάτμιση μιας ποσότητας νερού από αυτό που κυκλοφορεί στην παρειά. Έτσι ο αέρας που εισέρχεται στο θερμοκήπιο έχει χαμηλότερη θερμοκρασία και υψηλότερη υγρασία από τον εξωτερικό αέρα. Η αποτελεσματικότητα του συστήματος αυξάνεται σε περιοχές με ξηρό και θερμό κλίμα. Το πρόβλημα που παρουσιάζει το σύστημα αυτό είναι ότι η θερμοκρασία δεν είναι ομοιόμορφη κατά μήκος του θερμοκηπίου, κυρίως σε θερμοκήπια με μήκος μεγαλύτερο από 40 m.

#### β) Σύστημα υδρονέφωσης ή τεχνητής ομίχλης (Fog System)

Στις μέρες μας, τα συστήματα δροσισμού με τεχνητή ομίχλη επιτρέπουν τη δημιουργία περισσότερο ομοιογενών συνθηκών στο θερμοκήπιο, μειώνουν τις απαιτήσεις για δυναμικό αερισμό ενώ παράλληλα έχουν μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα ψύξης. Η αρχή του συστήματος αυτού βασίζεται στη μετατροπή της προσπίπτουσας ενέργειας ακτινοβολίας σε λανθάνουσα θερμότητα με εξάτμιση των σταγονιδίων νερού που ψεκάζονται από τις συσκευές υδρονέφωσης.

Τα αυτά συστήματα ψύξης χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: (α) υψηλής ( $\approx 6 \text{ MPa} \approx 60 \text{ bar}$ ) και (β) χαμηλής πίεσης ( $\approx 0.5 \text{ MPa} \approx 5 \text{ bar}$ ). Τα συστήματα δροσισμού υψηλής πίεσης παρέχουν εξαιρετικά λεπτά σταγονίδια νερού (π.χ.  $10 \mu\text{m}$ ) επιτρέποντας έτσι τη δημιουργία ομίχλης η οποία τείνει να παραμένει στον αέρα.



Η αποτελεσματικότητα  $Eff$  (%) του συστήματος δροσισμού με τεχνητή ομίχλη δίνεται από τη σχέση (ASHRAE 1983):

$$Eff = \frac{T_o - T_i}{T_o - T_{o,w}} 100\%$$

Τα συστήματα με τεχνητή ομίχλη διαφοροποιούνται από αυτά της υγρής παρειάς ως προς το γεγονός ότι η εξάτμιση του νερού πραγματοποιείται σε όλο τον όγκο του αέρα του θερμοκηπίου. Πλεονέκτημα του συστήματος αυτού έναντι των συστημάτων ψύξης με υγρή παρειά είναι η ομοιογένεια των συνθηκών που δημιουργούν στο θερμοκήπιο. Μειονέκτημα είναι το υψηλό κόστος εγκατάστασης και η απαίτηση για καλής ποιότητας νερό.

Επομένως γίνεται φανερό ότι υπάρχει η ανάγκη να ελέγχουν αποδοτικά τα συστήματα αυτά προκειμένου να επιτευχθούν οι βέλτιστες συνθήκες στο θερμοκήπιο. Ο έλεγχος των συστημάτων αυτών γίνεται με τη χρήση των λογισμικών-προσομοιωμάτων. Είναι γεγονός ότι τα περισσότερα προσομοιώματα-μοντέλα του κλίματος του θερμοκηπίου και της διαπνοής της καλλιέργειας βαθμονομήθηκαν και αναπτύχθηκαν αρχικά για περιοχές και συνθήκες της βόρειας Ευρώπης. Στις περιοχές αυτές τα θερμοκήπια είναι γενικά, φτωχά αεριζόμενα κατά το μεγαλύτερο διάστημα του έτους και η αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας τείνει να είναι κατά πολύ μικρότερη από αυτή των φυτών που αναπτύσσονται έξω από το θερμοκήπιο. Έτσι η καλλιέργεια είναι απομονωμένη από το εξωτερικό περιβάλλον λόγω του καλύμματος και η αισθητή και λανθάνουσα ενέργεια που απελευθερώνεται από την καλλιέργεια συγκεντρώνεται στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Κατά συνέπεια, η διαπνοή της καλλιέργειας αποκτά ένα ρυθμό ισορροπίας ο οποίος ελέγχεται από την καθαρή ακτινοβολία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.

Παρόλα αυτά, στις μεσογειακές χώρες, η υψηλή θερμοκρασία και το μεγάλο έλλειμμα κορεσμού του αέρα κάνουν τις κλιματικές συνθήκες στα θερμοκήπια των χωρών αυτών να είναι κατά πολύ διαφορετικές από αυτές των βόρειων χωρών. Το γεγονός της ύπαρξης παρατεταμένων περιόδων με συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και χαμηλής υγρασίας έχει δυσμενείς επιπτώσεις στην παραγωγή και την ποιότητα της παραγωγής των μεσογειακών θερμοκηπίων. Μια από τις λύσεις θα ήταν να βελτιωθεί ο σχεδιασμός, ο έλεγχος και η διαχείριση του συστήματος εξαερισμού. Αυτό απαιτεί μια σε βάθος μελέτη και κατανόηση των μηχανισμών σύζευξης και ανατροφοδότησης μεταξύ της καλλιέργειας, του περιβάλλοντος στο εσωτερικό του



θερμοκηπίου και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Παρόλο αυτά, δεν είναι πλήρως κατανοητό πως ο αερισμός επηρεάζει τους μηχανισμούς αυτούς. Ειδικότερα υπάρχουν λίγες πληροφορίες σχετικά με την αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας σε συνθήκες θερμοκηπίου και της εξάρτησης της από το ρυθμό αερισμού του θερμοκηπίου. Στο θερμοκήπιο υπάρχει η δυνατότητα έλεγχου της διαπνοής των καλλιεργειών και της ρύθμισης της σε επιθυμητά επίπεδα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται κυρίως η θέρμανση, η σκίαση, ο αερισμός και ο δροσισμός, συστήματα με τα οποία ρυθμίζονται άμεσα η ακτινοβολία  $R_n$ , η θερμοκρασία  $T_i$  και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα  $D_i$  (= διαφορά της πραγματικής πίεσης ατμών του αέρα με την πίεση ατμών του αέρα στον κορεσμό), παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν άμεσα ( $R_n$ ) ή έμμεσα ( $T_i$ ,  $D_i$ ) τη διαπνοή των καλλιεργειών.

#### 1.4 Σκοπός της εργασίας

Ο σκοπός της παρούσης εργασίας ήταν να χαρακτηριστεί η αεροδυναμική αγωγιμότητα των φύλλων μιας καλλιέργειας τομάτας, υπό συνθήκες θερμοκηπίου και να μελετηθεί η εξάρτηση της από την ταχύτητα του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο, το ρυθμό αερισμού, το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας και τα συστήματα θέρμανσης του θερμοκηπίου.

## **Κεφάλαιο 2 Θεωρητική ανάλυση**

## 2.1 Το ενεργειακό ισοζύγιο στο θερμοκήπιο

Το θερμοκήπιο μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύστημα. Το περιβάλλον του συστήματος ρυθμίζεται: α) από το εξωτερικό κλίμα και β) τον παραγωγό, ο οποίος χρησιμοποιεί τον εξοπλισμό του θερμοκηπίου προκειμένου να ελέγξει το κλίμα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Το σύστημα θερμοκήπιο μπορεί να χωρισθεί σε τρία επίπεδα, τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και είναι: η ατμόσφαιρα του θερμοκηπίου, η καλλιέργεια και το έδαφος. Η συμπεριφορά ολόκληρου του συστήματος εξαρτάται από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των βασικών επιπέδων και επηρεάζεται: από το εξωτερικό κλίμα και τις ενέργειες του παραγωγού (μέσω των επεμβάσεων του στο μικροκλίμα με τον εξοπλισμό του θερμοκηπίου) όσο και από την καλλιέργεια (μέσα από τις φυσιολογικές της λειτουργίες: διαπνοή, φωτοσύνθεση).

Προκειμένου να κατανοηθούν οι μηχανισμοί που εμπλέκονται στη δημιουργία και διαμόρφωση του μικροκλίματος του θερμοκηπίου θα πρέπει να ληφθεί υπόψη:

- Το ισοζύγιο ενέργειας στο θερμοκήπιο, το οποίο αναλύεται σε ισοζύγιο αισθητής και λανθάνουσας ενέργειας και
- Η διαπνοή, η οποία επηρεάζεται και επηρεάζει τα ισοζυγία αισθητής και λανθάνουσας ενέργειας.

Προκειμένου να εκτιμηθούν οι ενεργειακές ανταλλαγές στο επίπεδο του φύλλου, έχουν υιοθετηθεί από πολλούς συγγραφείς υποθέσεις και προσεγγίσεις. Έτσι θεωρείται ότι το φύλλο αντιπροσωπεύει μια επίπεδη επιφάνεια, από και προς την οποία, οι ροές ενέργειας είναι μονοδιάστατες (Monteith, 1973).

Κατά τη διάρκεια της ημέρας, η κύρια πηγή ενέργειας του θερμοκηπίου είναι η ηλιακή ακτινοβολία. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια του φύλλου, ένα μέρος απορροφάται από το φύλλο, ένα μέρος ανακλάται από αυτό και το υπόλοιπο διέρχεται μέσα από το φύλλο φτάνοντας στο έδαφος.

Το ενεργειακό ισοζύγιο στο θερμοκήπιο μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση:

$$R_n - H - \lambda E - J - C = 0 \quad (2.1)$$

όπου:  $R_n$  ( $W m^{-2}$ ) είναι η καθαρή ακτινοβολία στο θερμοκήπιο,  $H$  ( $W m^{-2}$ ) η αισθητή ενέργεια,  $\lambda$  ( $J kg^{-1}$ ) η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού,  $E$  ( $kg m^{-2}s^{-1}$ ) ο

ρυθμός εξατμισοδιαπνοής και J και C η ενέργεια ( $W\ m^{-2}$ ) που αποθηκεύεται στο έδαφος και την καλλιέργεια αντίστοιχα. Αναμφίβολα όλες οι παραπάνω ροές μπορεί να αντιπροσωπεύουν κέρδος ή απώλειες ενέργειας. Επειδή οι όροι J και C είναι σχετικά μικροί σε σχέση με τους H και λE, μπορεί να αγνοηθούν και έτσι το απλοποιημένο ενεργειακό ισοζύγιο του θερμοκηπίου, δίδεται από τη σχέση:

$$R_n = H + \lambda E \tag{2.2}$$

Η μεταβολή από την υγρή κατάσταση ενός σώματος στην αέρια, γίνεται με απορρόφηση ενέργειας, γνωστή ως λανθάνουσα ενέργεια. Αν το υγρό είναι σε επαφή με μια επιφάνεια, η ενέργεια θα αφαιρεθεί από την επιφάνεια αυτή, με αποτέλεσμα αυτή να ψυχθεί. Το γεγονός αυτό λαμβάνει χώρα με την εξάτμιση του νερού, που περιέχεται στους ιστούς του φύλλου, υπό μορφή υδρατμών, προς τον περιβάλλοντα αέρα. Κατά τη διαδικασία όμως ροής των υδρατμών από το φύλλο προς τον αέρα που τον περιβάλλει, παρεμβάλλονται κάποιου είδους αντιστάσεις, που δείχνουν το βαθμό ευκολίας που αυτοί μπορούν να αποδοθούν στον περιβάλλοντα αέρα.

Από πλευράς φυσικής, το θερμοκήπιο μπορεί να θεωρηθεί ως ένας ηλιακός συλλέκτης. Η σημαντικότερη διαφορά του από τον ηλιακό συλλέκτη, όσον αφορά στην προσομοίωση, είναι η παρουσία της καλλιέργειας που διαπνέει και με τον τρόπο αυτό τροποποιεί το ισοζύγιο λανθάνουσας ενέργειας. Χρησιμοποιώντας αυτήν την αναλογία με τον ηλιακό συλλέκτη, ο Baille (1996) πρότεινε τις παρακάτω σχέσεις για τον υπολογισμό της αισθητής και λανθάνουσας ενέργειας:

$$H = (1 - \alpha) R_n \tag{2.3}$$

$$\lambda E = \alpha R_n \tag{2.4}$$

Ο συντελεστής α εκφράζει το μέρος της καθαρής ενέργειας που μετατρέπεται σε λανθάνουσα. Η κατανομή της καθαρής ακτινοβολίας σε αισθητή και λανθάνουσα ενέργεια συχνά εκφράζεται από το λόγο Bowen:

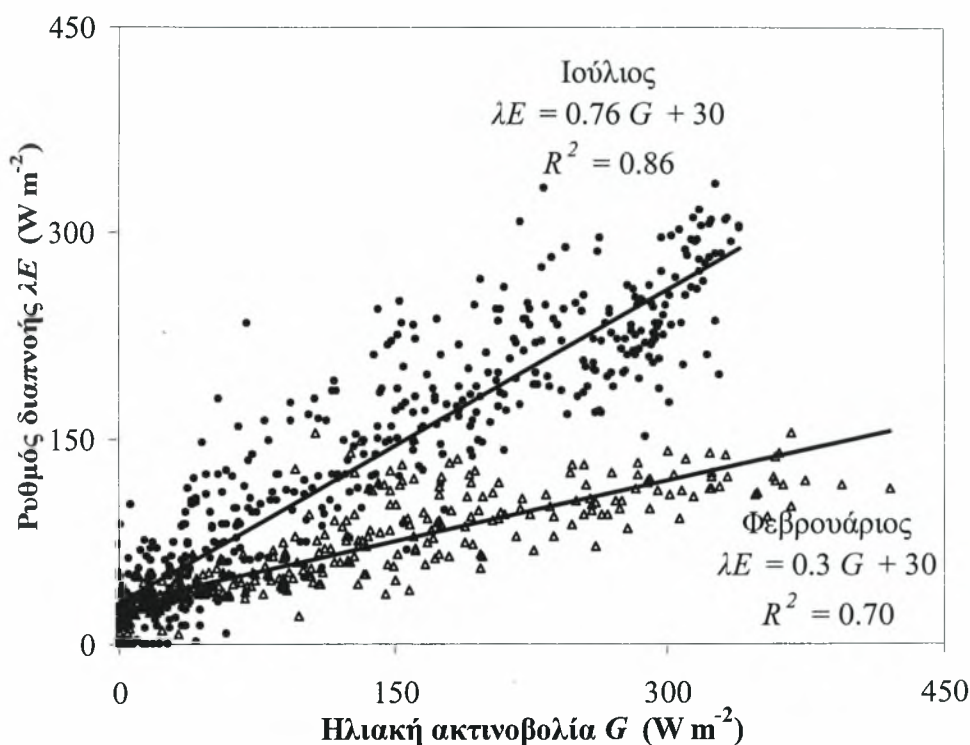
$$\beta = \frac{H}{\lambda E} \tag{2.5}$$

Ο λόγος Bowen εξαρτάται από την ένταση των φαινομένων εξατμισοδιαπνοής (Landsberg *et al.* 1979).

Το μέρος της καθαρής ακτινοβολίας που δεν μετατρέπεται σε λανθάνουσα θερμότητα, χρησιμοποιείται για τη θέρμανση και από δίδεται υπό μορφή αισθητής

θερμότητας με συναγωγή στον περιβάλλοντα αέρα. Και στην περίπτωση αυτή υπάρχει αντίσταση κατά τη ροή θερμότητας.

Η σχέση (2.5) αποτελεί μια προσεγγιστική εκτίμηση του ρυθμού εξατμισοδιαπνοής. Η καθαρή ακτινοβολία στο θερμοκήπιο  $R_n$  θα μπορούσε να θεωρηθεί προσεγγιστικά ότι κατά τη διάρκεια της ημέρας ισοδυναμεί με την ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται στο θερμοκήπιο  $G$  ( $W m^{-2}$ ). Κατά συνέπεια, η λανθάνουσα ενέργεια μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας (Morris *et al.* 1957, de Villèle 1972, van der Post *et al.* 1974, Yang *et al.* 1990, Κατσούλας και συνεργάτες 2000) (Σχήμα 2.1)



**Σχήμα 2.1** Διαπνοή  $\lambda E$  ( $W m^{-2}$ ), συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας  $G$  ( $W m^{-2}$ ), για δύο περιόδους του έτους: Φεβρουάριος και Ιούλιος σύμφωνα με τον Κατσούλα και συνεργάτες (2000).

Στην πραγματικότητα, το ποσοστό της ενέργειας στο θερμοκήπιο που χρησιμοποιείται για την εξατμισοδιαπνοή είναι μια πολύπλοκη συνάρτηση πολλών μικροκλιματικών και φυσιολογικών παραμέτρων οι οποίες είναι δύσκολο να μετρηθούν. Οι Garzoli and Blackwell (1973) βρήκαν πειραματικά ότι η διαπνοή μιας πλήρως ανεπτυγμένης καλλιέργειας μεταβάλλεται μεταξύ 48 και 75% της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας με μια μέση τιμή περίπου 57%.



## **2.2 Επίδραση των συστημάτων ελέγχου στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου και την καλλιέργεια**

### **2.2.1 Επίδραση συστήματος θέρμανσης**

Η θερμοκρασία της καλλιέργειας καθώς και ο τρόπος που αυτή μεταβάλλεται με τον περιβάλλοντα αέρα είναι από τις κρίσιμότερες παραμέτρους, οι οποίες επηρεάζουν όχι μόνο την αύξηση και την ανάπτυξη της καλλιέργειας, αλλά και την ποιότητα των παραγόμενων καρπών. Ο ρυθμός ανάπτυξης (έκπτυση φύλλων και εμφάνιση ανθέων) είναι συνήθως γραμμική συνάρτηση της θερμοκρασίας του αέρα γιατί περισσότερες καλλιέργειες και για ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών (Karlsson et al. 1991). Κατά ανάλογο τρόπο η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ καλλιέργειας και του περιβάλλοντος αέρα καθορίζει την τιμή της αεροδυναμικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας σε μεγάλο βαθμό και συνεπώς τις εναλλαγές θερμότητας και μάζας της καλλιέργειας με τον περιβάλλοντα αέρα.

Η σύγκριση των συστημάτων επιδαπέδιων σωλήνων και ο συνδυασμός τους με αερόθερμο σε ένα θερμοκήπιο κατά τη διάρκεια δυο περιόδων νύχτας έδειξε ότι η λειτουργία του αερόθερμου δεν επηρέασε μόνο τη διαφορά της θερμοκρασίας καλλιέργειας – αέρα αλλά και το έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας αέρα το οποίο επηρεάζει σημαντικά το ρυθμό διαπνοής της καλλιέργειας. Όλα αυτά έχουν ως αποτέλεσμα το μεγαλύτερο ρυθμό διαπνοής των φυτών εκείνη την περίοδο. Όπως ήταν αναμενόμενο την περίοδο που λειτουργούσε το αερόθερμο παράλληλα με την επιδαπέδια θέρμανση η αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας ήταν μεγαλύτερη τόσο λόγω της μεγαλύτερης τιμής της διαφοράς θερμοκρασίας καλλιέργειας αέρα (περίπου διπλάσια) όσο και λόγω της υψηλότερης τιμής της ταχύτητας του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου (Μπαρτζάνης, 2004).

## 2.2.2 Επίδραση συστήματος αερισμού

Στις χώρες με θερμό κλίμα, ο σημαντικός ρόλος του αερισμού, εξηγεί το αυξημένο ενδιαφέρον των ερευνητών να διερευνήσουν τη ροή του αερισμού στο θερμοκήπιο και να αποκτήσουν νέα, καλύτερη γνώση των μηχανισμών που την προκαλούν. Η μελέτη του αερισμού των θερμοκηπίων έγινε είτε με πειράματα (Fernandez and Bailey 1992, Bouland and Draoui 1995, Kittas *et al.* 1995, Bouland and Baille 1995, Kittas *et al.* 1996), είτε με τεχνικές προσομοίωσης με λογισμικά υπολογιστικής ρευστομηχανικής (Bouland *et al.* 1997, Mistriotis *et al.* 1997, Karica *et al.* 1998)

Η θερμοκρασία στο θερμοκήπιο επηρεάζεται σημαντικά από το ρυθμό ανανέωσης του αέρα, όταν αυτός είναι μικρότερος από 20 αλλαγές ανά ώρα, ενώ επηρεάζεται ελάχιστα, όταν ο ρυθμός ανανέωσης του αέρα είναι μεγαλύτερος από 30 h<sup>-1</sup> (Bouland and Baile 1993).

Ο αερισμός επιδρά και στην αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας, μέσω της μεταβολής που προκαλεί στην ταχύτητα του ανέμου στο θερμοκήπιο. Στην περίπτωση του κλειστού θερμοκηπίου, η ταχύτητα του ανέμου στο εσωτερικό του είναι πολύ μικρή και θα ήταν αποδεκτή μια σταθερή τιμή για την αεροδυναμική αγωγιμότητα. Η υπόθεση αυτή επιβεβαιώθηκε και με πειραματικά αποτελέσματα (Stanghellini 1987). Κατά τη διάρκεια περιόδων με αερισμό, η ταχύτητα του ανέμου στο εσωτερικό του θερμοκηπίου είναι σημαντική και η επίδραση της στην αεροδυναμική αγωγιμότητα δεν μπορεί να αγνοηθεί.

Εκτός από την αεροδυναμική αγωγιμότητα, επηρεάζει και την αγωγιμότητα στη μεταφορά των υδρατμών από το εσωτερικό του θερμοκηπίου στον εξωτερικό αέρα (αεροδυναμική αγωγιμότητα του θερμοκηπίου).

Ο αερισμός επιδρά στη θερμοκρασία της καλλιέργειας και με τον κατάλληλο ρυθμό αερισμού του θερμοκηπίου σε ξηρά και υγρά κλίματα μπορεί να διατηρήσει τη θερμοκρασία της καλλιέργειας κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία (π.χ. 28 °C για καλλιέργεια τομάτας). Στην περίπτωση μιας καλλιέργειας που διαπνέει ελεύθερα και έχουμε αύξηση του ρυθμού ανανέωσης του αέρα, η θερμοκρασία των φύλλων μειώνεται. Αντίθετα, αύξηση του ρυθμού ανανέωσης του αέρα πάνω από την τιμή των 30 h<sup>-1</sup> δεν προκαλεί σημαντική μείωση της θερμοκρασίας των φύλλων (Fuchs 1993, Montero and Anton 1994).

Ο αερισμός του θερμοκηπίου επηρεάζει και τη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας μέσω των μεταβολών που προκαλούνται στη θερμοκρασία της καλλιέργειας και στο έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα. Το έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα επηρεάζεται τόσο από τη θερμοκρασία της καλλιέργειας, όσο και από τον έλλειμμα κορεσμού του αέρα. Ο Bunce (1985) παρατήρησε ότι για την ίδια αύξηση του ελλείμματος κορεσμού του αέρα, η αγωγιμότητα της καλλιέργειας, όταν η ταχύτητα του ανέμου ήταν  $3 \text{ m s}^{-1}$ , μειωνόταν από 1.6 έως 3 φορές περισσότερο συγκριτικά με την περίπτωση όπου η ταχύτητα του ανέμου ήταν  $0.5 \text{ m s}^{-1}$ .

Οι Boulard and Baille (1993) έδειξαν πώς μεταβάλλεται η διαπνοή της καλλιέργειας συναρτήσει του ρυθμού ανανεώσεων του αέρα του θερμοκηπίου, αποδεικνύοντας πως η διαπνοή επηρεάζεται σημαντικά από τον αερισμό και το έλλειμμα κορεσμού.

### 2.2.3 Επίδραση συστήματος σκίασης

Η σκίαση επιδρά άμεσα στη θερμοκρασία και τη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μείωση της διαθέσιμης ενέργειας στο θερμοκήπιο και την καλλιέργεια. Η μείωση της εισερχόμενης ακτινοβολίας στο θερμοκήπιο αναμένεται να προκαλέσει μείωση του ελλείμματος κορεσμού καλλιέργειας-αέρα. Αν κατά την περίοδο χωρίς σκίαση, το έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα κυμαινόταν σε υψηλά επίπεδα (κάτι που ισχύει για τα μεσογειακά θερμοκήπια), η σκίαση του θερμοκηπίου μπορεί να οδηγήσει την καλλιέργεια εκτός συνθηκών υδατικής και θερμικής καταπόνησης και κατά συνέπεια σε αύξηση της στοματικής αγωγιμότητας (Κατσούλας 2002). Αρκετοί ερευνητές (Boulard *et al.* 1991, Dayan *et al.* 1991, Fernandez-Rodriguez *et al.* 2000) αναφέρουν ότι η σκίαση του θερμοκηπίου προκαλεί μείωση της θερμοκρασίας και της διαπνοής της καλλιέργειας.

## 2.2.4 Επίδραση συστήματος δροσισμού

Με τη χρήση του συστήματος με τεχνητή ομίχλη μπορεί να επιτευχθεί θερμοκρασία του αέρα στο θερμοκήπιο μικρότερη από αυτήν του εξωτερικού αέρα , ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται μείωση και του ελλείμματος κορεσμού του αέρα , συμβάλλοντας έτσι στη μείωση της θερμικής και υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας. Εκτός της μείωσης της θερμοκρασίας του αέρα με το δροσίμο προκαλείται και μείωση της θερμοκρασίας της καλλιέργειας άμεσα, όταν η εξάτμιση του νερού λαμβάνει χώρα πάνω στα φύλλα, η έμμεσα, μέσω της μείωσης της θερμοκρασίας του αέρα και της μεταβολής της διαπνοής. Επιπλέον, μέσω της μείωσης της θερμοκρασίας και του αέρα τροποποιείται η στοματική και αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας, οι οποίες, μαζί με το έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα, επηρεάζουν τη διαπνοή της καλλιέργειας. Παράλληλα λόγω της ισχυρής ομίχλης που επικρατεί στο θερμοκήπιο, μειώνεται και η ένταση της προσπίπτουσας στην καλλιέργεια ακτινοβολίας.

## 2.3 Διαπνοή

Διαπνοή είναι η αποβολή νερού με εξάτμιση από τα φύλλα διαμέσου των στομάτων, της επιδερμίδας (εφυμενίδας) και των βοθρίων. Επειδή η διαπνοή από την επιδερμίδα των φύλλων έχει πολύ μικρές τιμές, ο κυριότερος ρυθμιστής της διαπνοής των φυτών είναι τα στομάτια. Οι υδρατμοί για να εξέλθουν στον αέρα πρέπει να υπερνικήσουν μια σειρά αντιστάσεων, όπως: κυτταρικά τοιχώματα, υποστομάτια κοιλότητα, πόρος στόματος, οριακό στρώμα αέρα στην επιφάνεια του φύλλου. Με τη διαπνοή τα φυτά ρυθμίζουν σε μεγάλο βαθμό την υδατική τους κατάσταση. Έχει βρεθεί ότι οι απώλειες νερού με τη διαπνοή για την καλλιέργεια της τομάτας σε μια βλαστική περίοδο είναι  $125 \text{ Kg.m}^{-2}$ .

Η διαπνοή των φυτών είναι το σημαντικότερο μέρος του ισοζυγίου της λανθάνουσας ενέργειας και ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία του ενεργειακού ισοζυγίου. Η διαπνοή απαιτεί ενέργεια, η οποία προέρχεται συνήθως από την ηλιακή

ακτινοβολία. Όπως παρατηρήθηκε από πολλούς ερευνητές (π.χ.: Morris *et al.* 1957, de Villèle 1972, van der Post *et al.* 1974 για καλλιέργεια τομάτας, Yang *et al.* 1990 για καλλιέργεια αγγουριού και Κατσούλας και συνεργάτες 2000 για καλλιέργεια τριανταφυλλιάς), υπάρχει μεγάλη συσχέτιση μεταξύ της διαπνοής των φυτών και της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας πάνω από τα φυτά. Η αύξηση λοιπόν τόσο της έντασης όσο και της διάρκειάς της προκαλεί την αύξηση της διαπνοής, καθώς επίσης και την αύξηση της θερμοκρασίας της καλλιέργειας, όταν οι υπόλοιποι παράγοντες παραμένουν σταθεροί (υγρασία και θερμοκρασία περιβάλλοντος) (Stanghellini 1987). Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας για τη διαπνοή είναι η φυλλική επιφάνεια. Προφανώς, όταν δεν υπάρχει κανένα φύλλο, δεν υπάρχει διαπνοή. Όταν υπάρχουν μόνο νέα σπορόφυτα με μια πολύ μικρή φυλλική επιφάνεια, η διαπνοή είναι ελάχιστη. Αντίθετα, όταν έχουμε ώριμες καλλιέργειες με μεγάλη φυλλική επιφάνεια έχουμε μεγαλύτερη διαπνοή. Έτσι, για παράδειγμα, για νεαρές καλλιέργειες τομάτας και αγγουριού είναι περίπου το 1/5 της τιμής του αντίστοιχου συντελεστή για ώριμη καλλιέργεια (de Graaf and van den Ende 1981).

Σε ώριμες καλλιέργειες δεν είναι τόσο σημαντικό η ακριβή τιμή της φυλλικής επιφάνειας. Έτσι πέρα από μια ορισμένη φυλλική επιφάνεια, το ακριβές μέγεθος της φυλλικής επιφάνειας έχει λίγη επίδραση.

Η υγρασία του αέρα είναι σημαντική επίσης. Η επίδραση της είναι εντονότερη όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι χαμηλή, ή όταν η υγρασία είναι είτε πολύ χαμηλή είτε πολύ υψηλή. Υπό κανονικές συνθήκες, που είναι σε μια ώριμη συγκομιδή, κατά τη διάρκεια της ημέρας, και με τη μέτρια υγρασία αέρα, η ηλιακή ακτινοβολία έχει μια συντριπτική επίδραση στο ποσό της διαπνοής. Η επίδρασή της χαρακτηρίζεται από το έλλειμμα κορεσμού του αέρα  $D_i$  (kPa), το οποίο ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της πίεσης ατμών του αέρα, όταν αυτός βρίσκεται στον κορεσμό  $e_i^*$  (kPa), με την πραγματική πίεση του αέρα  $e_i$  (kPa). Το έλλειμμα κορεσμού, ένα χαρακτηριστικό της ξηρότητας του αέρα, για μια δεδομένη θερμοκρασία είναι αντιστρόφως ανάλογο της υγρασίας του αέρα. Είναι απαραίτητο, όμως να λάβουμε υπόψη το έλλειμμα κορεσμού του αέρα, στην περίπτωση που χρησιμοποιείται κάποιο σύστημα θέρμανσης, δροσισμού ή αφύγρανσης. (Κατσούλας, 2002)

Η βασική εξίσωση για τον υπολογισμό της διαπνοής είναι αυτή των Penman-Monteith (Monteith 1973) (επεξηγηματικό, μηχανισμικό προσομοίωμα), η οποία έχει αναπτυχθεί για καλλιέργειες ανοιχτού αγρού, είναι αρκετά απλή και παρέχει ακριβείς εκτιμήσεις της εξατμισοδιαπνοής μιας καλλιέργειας.

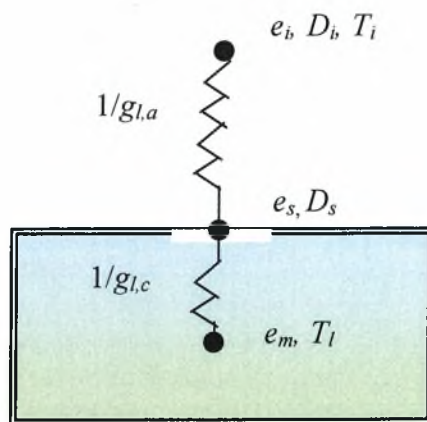


### 2.3.1 Η εξίσωση των Penman-Monteith

Ο ρυθμός μεταφοράς υδρατμών από το εσωτερικό ενός φύλλου στην επιφάνειά του  $\lambda E_{l,s}$  ( $\text{W m}^{-2}$ ) δίνεται συναρτήσει της αγωγιμότητας στη μεταφορά των υδρατμών από το εσωτερικό του φύλλου στην επιφάνειά του (στοματική αγωγιμότητα)  $g_{l,c}$  ( $\text{m s}^{-1}$ ) και της διαφοράς μεταξύ της πίεσης ατμών στο εσωτερικό του φύλλου  $e_m$  (kPa) και της πίεσης ατμών στην επιφάνεια του φύλλου  $e_s$  (kPa) (Σχήμα 2.1), από τη σχέση:

$$\lambda E_{l,s} = \frac{\rho C_p g_{l,c}}{\gamma} (e_m - e_s) \quad (2.6)$$

Η στοματική αγωγιμότητα υπολογίζεται συναρτήσει διαφόρων κλιματικών παραμέτρων. Οι Collatz *et al.* (1991) έχουν κάνει ανασκόπηση στις σχέσεις που υπάρχουν για τον υπολογισμό της στοματικής αγωγιμότητας



**Σχήμα 2.2.** Σχηματική απεικόνιση της στοματικής  $g_{l,c}$  και της αεροδυναμικής  $g_{l,a}$  αγωγιμότητας ενός φύλλου.  $e_b$ ,  $D_b$  και  $T_i$  είναι η πίεση ατμών, το έλλειμμα κορεσμού και η θερμοκρασία του αέρα αντίστοιχα,  $e_m$  και  $T_l$  η πίεση ατμών και η θερμοκρασία του φύλλου και  $e_s$  και  $D_s$  η πίεση ατμών και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα στην επιφάνεια του φύλλου.

Ο ρυθμός μεταφοράς υδρατμών από την επιφάνεια του φύλλου στον αέρα  $\lambda E_{l,a}$  ( $\text{W m}^{-2}$ ) δίδεται σε συνάρτηση με την αεροδυναμική αγωγιμότητα του φύλλου  $g_{l,a}$  ( $\text{m}$



$s^{-1}$ ) και τη διαφορά μεταξύ της πίεσης ατμών στην επιφάνεια του φύλλου  $e_s$  (kPa) και της πίεσης ατμών του αέρα  $e_i$  (kPa) από τη σχέση:

$$\lambda E_{l,a} = \frac{\rho C_p g_{l,a}}{\gamma} (e_s - e_i) \quad (2.7)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (2.6) και (2.7) προκύπτει η σχέση που περιγράφει το ρυθμό μεταφοράς υδρατμών από το εσωτερικό του φύλλου στον αέρα  $\lambda E_l$  ( $W\ m^{-2}$ ):

$$\lambda E_l = \frac{\frac{\rho C_p}{\gamma} (e_m - e_i)}{(g_{l,c})^{-1} + (g_{l,a})^{-1}} \quad (2.8)$$

Αν θεωρήσουμε ότι ο αέρας που υπάρχει στους υποστομάτιους χώρους βρίσκεται στον κορεσμό και ότι η θερμοκρασία της επιφάνειας του φύλλου  $T_l$  ( $^{\circ}C$ ) είναι αντιπροσωπευτική της θερμοκρασίας του φύλλου, τότε έχουμε:

$$e_m = e^*(T_l) \quad (2.9)$$

και συνεπώς η (2.8) γίνεται:

$$\lambda E_l = \frac{\frac{\rho C_p}{\gamma} [e^*(T_l) - e_i]}{(g_{l,c})^{-1} + (g_{l,a})^{-1}} = \rho C_p D_c g_{l,t} \quad (2.10)$$

όπου:  $[e^*(T_l) - e_i]$  είναι το έλλειμμα κορεσμού φύλλου-αέρα  $D_c$  (kPa) και  $g_{l,t}$  ( $m\ s^{-1}$ ) η συνολική αγωγιμότητα ενός φύλλου  $[= (g_{l,a})^{-1} + (g_{l,c})^{-1}]$ .

Η πίεση ατμών στον κορεσμό στη θερμοκρασία του φύλλου  $e^*(T_l)$ , δίδεται από τη σχέση:

$$e^* (T_l) = e_i^* + \delta (T_l - T_i) \quad (2.11)$$

όπου  $e_i^*$  (kPa) είναι η πίεση ατμών του αέρα στον κορεσμό (\*) και  $\delta$  είναι η κλίση της καμπύλης κορεσμού του αέρα ( $=de_i^*/dT_i$ ) (kPa K<sup>-1</sup>). Από τις σχέσεις (2.10) και (2.11) προκύπτει η σχέση:

$$\lambda E_l = \frac{\frac{\delta \rho C_p}{\gamma} (T_l - T_i) + \frac{\delta \rho C_p}{\gamma} (e_i^* - e_i)}{(g_{l,c})^{-1} + (g_{l,a})^{-1}} \quad (2.12)$$

Η σχέση που περιγράφει τη μεταφορά της αισθητής ενέργειας από ένα φύλλο στον αέρα είναι:

$$H = \rho C_p g_{l,a} (T_l - T_i) \quad (2.13)$$

Σύμφωνα με την υπόθεση που διατυπώθηκε, ότι η αγωγιμότητα στη μεταφορά ενέργειας είναι ίδια με αυτή στη μεταφορά μάζας, από τις εξισώσεις (2.2), (2.12) και (2.13) προκύπτει η σχέση των Penman-Monteith (Monteith 1973):

$$\lambda E_l = \frac{\delta R_n + \rho C_p D_i g_{l,a}}{\delta + \gamma \left(1 + \frac{g_{l,a}}{g_{l,c}}\right)} \quad (2.14)$$

Η σχέση (2.14) εκτιμά τη διαπνοή ενός φύλλου συναρτήσει:

- της καθαρής ακτινοβολίας  $R_n$ , που απορροφάται από το φύλλο και του ελλείμματος κορεσμού του αέρα  $D_i$ . Οι μεταβλητές αυτές χαρακτηρίζουν το μικροκλίμα γύρω από το φύλλο, με την  $R_n$  να είναι συνάρτηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας του φύλλου,
- των χαρακτηριστικών αγωγιμοτήτων του φύλλου, δηλαδή της στοματικής και της αεροδυναμικής αγωγιμότητας.

## 2.4 Στοματική αγωγιμότητα

Με τον όρο στοματική αγωγιμότητα εννοείται η αγωγιμότητα στη μεταφορά των υδρατμών από το εσωτερικό του φύλλου στην επιφάνεια του. Παίζει σημαντικό ρόλο στον καταμερισμό της ενέργειας σε αισθητή και λανθάνουσα και επηρεάζεται από μία σειρά παραμέτρων του μικροκλίματος.

Η στοματική αγωγιμότητα, στο επίπεδο του φύλλου ή της καλλιέργειας, έχει συσχετιστεί με την ηλιακή ακτινοβολία, το έλλειμμα κορεσμού, τη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> στον αέρα, καθώς επίσης και με το υδατικό δυναμικό του φύλλου (Stanghellini 1987) ή με φυσιολογικούς παράγοντες, όπως η φωτοσύνθεση (Collatz *et al.* 1991) και η διαπνοή (Monteith 1973, Monteith 1995). Από τους ανωτέρω παράγοντες, ως γνωστόν, το σπουδαιότερο ρόλο παίζει η ακτινοβολία. Παρά το γεγονός ότι έχει βρεθεί η μορφή της σχέσης της στοματικής αγωγιμότητας με τους παραπάνω παράγοντες (π.χ.: Stanghellini 1987), δεν έχει αναπτυχθεί ως τώρα κάποιο μηχανιστικό μοντέλο, το οποίο να προβλέπει το άνοιγμα των στομάτων και έτσι μόνο εμπειρικές μέθοδοι είναι διαθέσιμες.

Επιπλέον, επειδή δεν υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία αρκετές αναφορές σχετικά με τη στοματική αγωγιμότητα των θερμοκηπιακών καλλιεργειών, τόσο στο επίπεδο του φύλλου όσο και στο επίπεδο της καλλιέργειας, θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική η απόκτηση περισσότερης γνώσης, σχετικής με τη συμπεριφορά και την αντίδραση της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας στις αλλαγές του μικροκλίματος του θερμοκηπίου. Αυτό είναι απαραίτητο, αφενός μεν για να ελεγχθεί η ισχύς των παραπάνω προσομοιωμάτων, αφετέρου δε για να εκληφθούν ορθά υπόψη οι επιδράσεις που προκαλούνται από το μικροκλίμα του θερμοκηπίου και την ιδιαιτερότητα του σε σχέση με τον ανοιχτό αγρό, στη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας. Τέλος, η στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας μπορεί να υπολογιστεί:

- με αντιστροφή και λύση της σχέσης (2.10) για την περίπτωση ενός φύλλου ή της καλλιέργειας, χρησιμοποιώντας τις ανάλογες αγωγιμότητες:

$$g_c = \frac{\rho C_p}{\gamma \lambda E} D_c - g_a \quad (2.15)$$

- με αντιστροφή της εξίσωσης των Penman-Monteith, [σχέση (2.14) για την περίπτωση ενός φύλλου].

## 2.5 Αεροδυναμική αγωγιμότητα

Η αεροδυναμική αγωγιμότητα, η οποία αντιπροσωπεύει τη μεταφορά των υδρατμών από την επιφάνεια του φύλλου ή της καλλιέργειας στον περιβάλλοντα αέρα, μπορεί να υπολογιστεί με δύο τρόπους: είτε συναρτήσει της αισθητής ενέργειας της καλλιέργειας και της διαφοράς θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα (Seginer 1984), είτε με την κλασική θεωρία της μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιώντας αδιάστατους αριθμούς (Stanghellini 1987). Στην εργασία αυτή, η αεροδυναμική αγωγιμότητα υπολογίστηκε με τον δεύτερο τρόπο.

Αν εφαρμόσουμε τη σχέση (2.13) στην περίπτωση μιας καλλιέργειας και λύσουμε τη σχέση ως προς την αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας προκύπτει η παρακάτω σχέση:

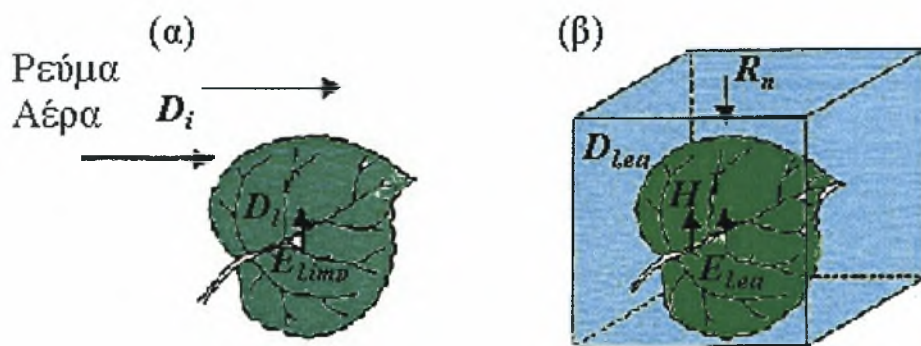
$$g_a = \rho C_p \frac{H}{\Delta T_c} \quad (2.16)$$

Το πρόβλημα που προκύπτει συνήθως από τη χρήση της σχέσης (2.16), σχετίζεται με την επιλογή των σημείων στα οποία θα υπολογιστεί η διαφορά θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα  $\Delta T_c$ . Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές διαφωνίες ως προς το ποια διαφορά θερμοκρασίας πρέπει να λαμβάνεται. Στην περίπτωση που η αεροδυναμική αγωγιμότητα υπολογιστεί από μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα πάνω και όχι μέσα στην καλλιέργεια, το αποτέλεσμα είναι περισσότερο μια ενδεικτική τιμή (Yang 1995).

## 2.6 Σύζευξη καλλιέργειας με τον περιβάλλοντα αέρα-παράγοντας $\Omega$

Όπως αναφέρουν οι Penman (1948) και Monteith (1973), η διαπνοή αποτελείται από δύο συνιστώσες: τη διαπνοή 'εξισορρόπησης'  $\lambda E_{eq}$  (equilibrium), η οποία εξαρτάται από τη διαθέσιμη καθαρή ακτινοβολία και την 'επιβαλλόμενη' διαπνοή  $\lambda E_{imp}$  (imposed) που εξαρτάται από το έλλειμμα κορεσμού του αέρα και ρυθμίζεται από τη στοματική αγωγιμότητα.

Προκειμένου να κατανοήσουμε καλύτερα τις έννοιες της επιβαλλόμενης διαπνοής  $\lambda E_{imp}$  και της διαπνοής εξισορρόπησης  $\lambda E_{eq}$ , θεωρούμε ένα φύλλο πάνω από το οποίο διέρχεται ένα ρεύμα αέρα (Σχήμα.2.2). Αν οι συνθήκες θερμοκρασίας και ελλείμματος κορεσμού του αέρα στην επιφάνεια του φύλλου ήταν ίδιες με αυτές του διερχόμενου ρεύματος αέρα, τότε θα υπήρχε τέλεια σύζευξη μεταξύ φύλλου και αέρα (οριακή κατάσταση). Αυτό θα συνέβαινε αν το φύλλο ήταν πολύ καλά αεριζόμενο με αποτέλεσμα το οριακό επιφανειακό στρώμα να είναι πολύ λεπτό και ο ρυθμός ανταλλαγής υδρατμών της επιφάνειάς του με τον αέρα υψηλός.



Σχήμα 2.3. (α) Πλήρως συζευγμένο φύλλο, (β) μη συζευγμένο φύλλο.

Σε μια εκ διαμέτρου αντίθετη οριακή κατάσταση μπορούμε να θεωρήσουμε ένα φύλλο εντελώς απομονωμένο από το περιβάλλον του (Σχήμα 2.2.β). Εξαιτίας της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο φύλλο, της μειωμένης, λόγω κλειστού χώρου, θερμότητας με συναγωγή και των υδρατμών (λόγω διαπνοής) που συνεχώς προστίθενται στον αέρα γύρω από το απομονωμένο φύλλο, η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα αυξάνουν συνεχώς, ενώ το έλλειμμα κορεσμού στην επιφάνεια του φύλλου είναι αρκετά διαφορετικό από αυτό του περιβάλλοντος αέρα.

Το ποσοστό συνεισφοράς της μιας ή της άλλης συνιστώσας στη συνολική διαπνοή εξαρτάται από το βαθμό σύζευξης των φύλλων με τον περιβάλλοντα αέρα. Ο βαθμός αυτός εκφράζεται με έναν αδιάστατο συντελεστή, τον 'παράγοντα Ωμέγα'  $\Omega$ . Ο παράγοντας  $\Omega$  εξαρτάται από το λόγο της αεροδυναμικής αγωγιμότητας προς τη στοματική αγωγιμότητα, λαμβάνει τιμές από 0 έως 1.

Όσο μικρότερες είναι οι τιμές του παράγοντα  $\Omega_i$  τόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση της μεταβολής της στοματικής αγωγιμότητας στη διαπνοή. Στην αντίθετη περίπτωση, η διαπνοή δεν επηρεάζεται από τις αλλαγές της στοματικής αγωγιμότητας και εξαρτάται κυρίως από τη διαθεσιμότητα της καθαρής ακτινοβολίας.



## **Κεφάλαιο 3 Υλικά και Μέθοδοι**

### 3.1 Το θερμοκήπιο



*Εικόνα 3.1 Απεικόνιση του θερμοκηπίου στο Βελεστίνο.*

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στην περιοχή του Βελεστίνου, 18 χιλιόμετρα από το Βόλο και νοτιοδυτικά του νομού Μαγνησίας, όπου βρίσκονται οι εγκαταστάσεις του Αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Οι μετρήσεις έγιναν σε τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο, επιφάνειας  $160 \text{ m}^2$  (20 μέτρα μήκος και 8 μέτρα πλάτος) με μέγιστο ύψος 4,1 m στον κορφιά, ενώ το ύψος του ορθοστάτη έφτανε τα 2,9 m. Το υλικό του σκελετού ήταν γαλβανισμένος χάλυβας. Το έδαφος του θερμοκηπίου ήταν πλήρως καλυμμένο με αδιαφανές, διπλής όψεως ασπρόμαυρο πλαστικό.

Στα θερμοκήπια υπήρχαν ανοίγματα πλαϊνά, κατά μήκος των δύο μεγάλων πλευρών, διαστάσεων  $1 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ . Επομένως, για τον φυσικό εξαερισμό τους τα πλαϊνά ανοίγματα, επαρκούσαν, με σχέση συνολικής επιφάνειας αερισμού προς επιφάνεια του θερμοκηπίου ίση με 17%. Ο αερισμός ελέγχονταν με μικροελεγκτή του συστήματος ελέγχου του μικροκλίματος του θερμοκηπίου, όταν η θερμοκρασία ξεπερνούσε τους  $23^\circ \text{C}$



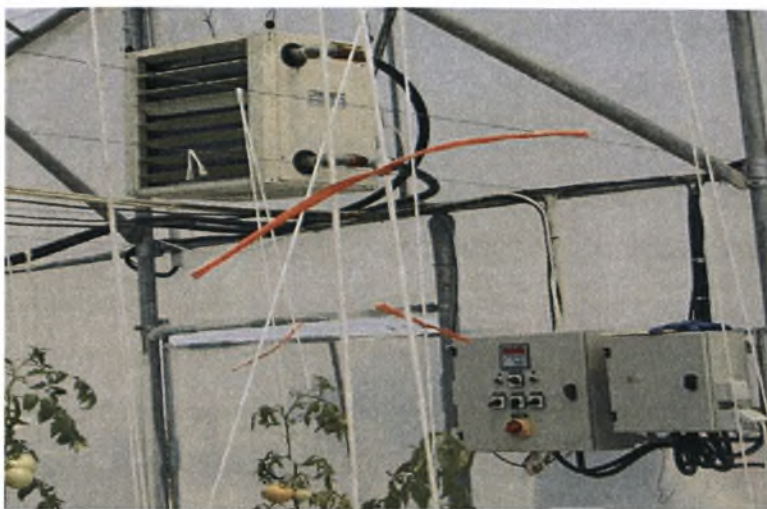
*Εικόνα 3.2 Άποψη των πλαϊνών ανοιγμάτων του θερμοκηπίου που χρησιμοποιούνται για αερισμό.*

Η θέρμανση του θερμοκηπίου γινόταν από ένα δίκτυο σωληνώσεων ζεστού νερού ενώ συμπληρωματικά υπήρχε και ένα αξονικό αερόθερμο, τοποθετημένο σε απόσταση 2.5 m από το έδαφος του θερμοκηπίου και σε απόσταση 0.5 m από την είσοδο του. Η θερμοκρασία θερμοστάτη ορίστηκε στους 15 °C κατά τη διάρκεια της νύχτας και 21 °C κατά τη διάρκεια της ημέρας. Οι θερμοστάτες τοποθετήθηκαν στο κέντρο του θερμοκηπίου, 2 m πάνω από το έδαφος. Ως καύσιμη ύλη χρησιμοποιήθηκε το πετρέλαιο.



*Εικόνα 3.3 Άποψη του λέβητα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου καθώς και του συστήματος απαγωγής των καυσαερίων και της δεξαμενής του πετρελαίου.*





*Εικόνα 3.4 Άποψη στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, στην οποία διακρίνονται το αερόθερμο τοίχου.*

### 3.2 Η καλλιέργεια



*Εικόνα 3.5. Διάταξη των φυτών εντός του θερμοκηπίου.*

Χρησιμοποιήθηκαν φυτά τομάτας, (*Lycopersicon esculentum*), ποικιλία Belladona. Πρόκειται για ποικιλία αυτογονιμοποιούμενη, με χαρακτηριστικό τη μεγάλη διάρκεια ζωής στον καρπό. Τα φυτά τομάτας μεταφτεύτηκαν στις 8 Μαρτίου, σε ηλικία 32 ημερών από τη σπορά, (είχαν εκπτυχθεί τα 6 φύλλα). Η καλλιέργεια ολοκληρώθηκε στις 10 Ιουλίου.

Ακολουθήθηκαν οι παρακάτω καλλιεργητικές τεχνικές στο θερμοκήπιο, όμοιες με αυτές που εκτελούν οι παραγωγοί.

Τα φυτά αναπτύχθηκαν μονοστέλεχα. Αναρτήθηκαν και αφέθηκαν να αναπτυχθούν κατακόρυφα, ενώ οριζόντια σύρματα πάνω από την καλλιέργεια χρησιμοποιήθηκαν για την στήριξη των φυτών. Δύο φορές την εβδομάδα αφαιρούνταν οι λαίμαργοι βλαστοί.

Μετά τη συγκομιδή των καρπών της πρώτης ταξικαρπίας αφαιρέθηκαν τα υποκείμενα φύλλα, ώστε να δημιουργηθούν καλύτερες συνθήκες σχετικής υγρασίας στο μικρο-περιβάλλον του φυτού. Το ίδιο επαναλήφθηκε στην δεύτερη ταξικαρπία. Επίσης, σε κάθε ταξικαρπία αφέθηκαν 5 καρποί.

Η κορυφή των φυτών, αφαιρέθηκε όταν τα φυτά έφτασαν στην όγδοη ταξικαρπία.

### 3.3 Το τεχνητό φύλλο



*Εικόνα 3.6 Το τεχνητό φύλλο.*

Τα τεχνητά φύλλα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν σύνθετα φύλλα παρόμοια με αυτά των φυτών τριανταφυλλιάς αποτελούμενα από 5 φυλλάρια . Κάθε σύνθετο φύλλο είχε μήκος 15 cm, και πλάτος 11 cm και συνολική επιφάνεια  $A_l$  86 cm<sup>2</sup>. Τα φύλλα ήταν κατασκευασμένα από δυο φύλλα χαλκού πάχους 0.2 mm το κάθε ένα, μεταξύ των φύλλων υπήρχε καλώδιο κωνσταντάνης πάχους 0.1 mm και συνολικής αντίστασης 10

Ω, το οποίο χρησιμοποιούνταν για τη θέρμανση των φύλλων. Το καλώδιο κονσταντάνης βρισκόταν μεταξύ δυο φύλλων μονωτικής-κολλητικής ταινίας διπλής όψεως τα οποία βρισκόταν μεταξύ των φύλλων χαλκού προκειμένου να συγκρατούνται μεταξύ τους τα φύλλα χαλκού. Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας των τεχνητών φύλλων χρησιμοποιήθηκαν 5 θερμοζεύγη χαλκού-κονσταντάνης τα οποία είχαν τοποθετηθεί μεταξύ των φύλλων χαλκού και ήταν συνδεδεμένα παράλληλα έτσι ώστε να υπολογίζεται μια μέση τιμή της θερμοκρασίας για κάθε τεχνητό φύλλο.

Για τις ανάγκες αυτής της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δύο ζευγάρια φύλλων τα οποία ήταν συνδεδεμένα ανά δυο σε σειρά, δημιουργώντας έτσι δυο ανεξάρτητα κυκλώματα, με το ένα φύλλο από το κάθε ζευγάρι να είναι συνδεδεμένο στο πρώτο κύκλωμα και το άλλο στο δεύτερο κύκλωμα. Διακόπτες που ελέγχονταν αυτόματα από σύστημα καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων, άνοιγαν και έκλειναν την παροχή ρεύματος στα δυο κυκλώματα ανά περιόδους συνολικής διάρκειας 50 λεπτών : αρχικά διοχετεύονταν ρεύμα στο πρώτο κύκλωμα για 20 λεπτά έτσι ώστε ένα φύλλο από το κάθε ζευγάρι να θερμαίνεται και ακολουθούσε ένα διάστημα 5 λεπτών όπου κανένα φύλλο δεν θερμαίνονταν. Στη συνέχεια διοχετεύονταν ρεύμα στο δεύτερο κύκλωμα και ακολούθησε και πάλι ένα διάστημα 5 λεπτών όπου κανένα φύλλο δεν θερμαίνονταν πριν αρχίσει ο κύκλος και πάλι από την αρχή. Οι περίοδοι χωρίς θέρμανση των φύλλων ήταν απαραίτητοι προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι οποίες διαφορές θερμοκρασίας υπήρχαν μεταξύ των φύλλων, πριν τη θέρμανση τους, και οι οποίες προκαλούνταν από αστάθμητους παράγοντες όπως π.χ. διαφορετική σκίαση των φύλλων. Η θέρμανση των φύλλων γίνονταν με παροχή συνεχούς ρεύματος με την εφαρμογή διαφοράς δυναμικού μεταξύ των άκρων του κυκλώματος από 4 έως 10 Volt, προκειμένου να επιτυγχάνονται διαφορετικές διαφορές θερμοκρασίας φύλλων-αέρα. Η ισχύς  $P_i$  (W) που παρέχονταν ανά  $m^2$  επιφάνειας φύλλου ήταν:

$$P_i = R_i I_p^2 / 2A_i$$

όπου  $I_p$  (Amp) η ένταση του ρεύματος στο κύκλωμα των τεχνητών φύλλων.

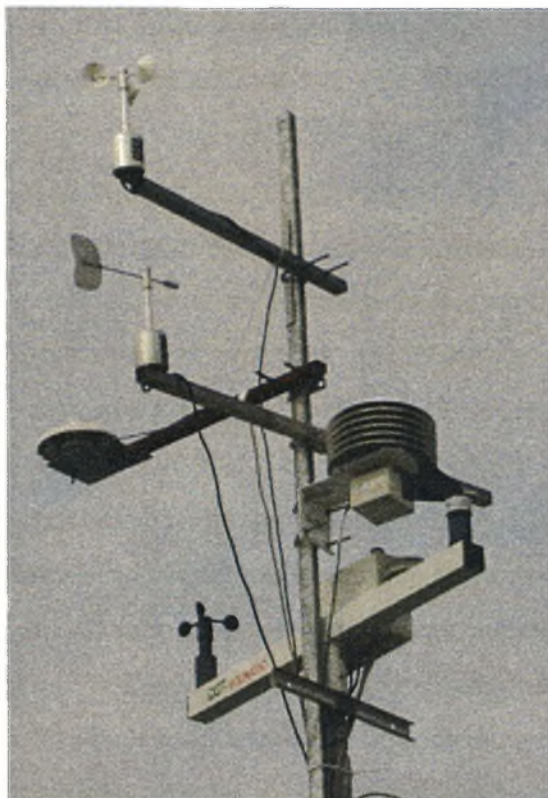


## Μετρήσεις

Οι μετρήσεις που έγιναν κατά τη διάρκεια του πειράματος αφορούσαν κυρίως τους κλιματικούς παράγοντες μέσα και έξω από το θερμοκήπιο, τη διαπνοή και τη φυλλική επιφάνεια των φυτών . Καθώς και την αεροδυναμική αγωγιμότητα των φύλλων

Αναλυτικότερα έξω από το θερμοκήπιο καταγραφόταν:

- ✓ η θερμοκρασία( $T_o$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ) και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα ( $D_o$ , kPa) με αεριζόμενο ψυχρόμετρο τύπου Assam (τύπος VP1, Delta-T Devices, Cambridge, UK). Το έλλειμμα κορεσμού του αέρα υπολογιζόταν από μετρήσεις της θερμοκρασίας του υγρού και ξηρού θερμόμετρου.
- ✓ η ηλιακή ακτινοβολία ( $G_o$ ,  $\text{W m}^{-2}$ ) με πυρανόμετρο (τύπος CM-6B, Kipp and Zonen, Delft, the Netherlands).
- ✓ η ταχύτητα ( $u$ ,  $\text{m s}^{-1}$ ) του άνεμου με ανεμόμετρο κυπέλλων (τύπος AN1-UM-3, Delta-T Devices, Cambridge, UK) και διεύθυνση του άνεμου με ανεμοδείκτη (τύπος WD1- UM-3, Delta-T Devices, Cambridge, UK)



*Εικόνα 3.7 Εξωτερικός μετεωρολογικός ιστός για την καταγραφή των εξωτερικών κλιματικών παραμέτρων*

Στο εσωτερικό του θερμοκηπίου καταγραφόταν:

- ✓ η θερμοκρασία ( $T_i$ , °C) και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα ( $D_i$ , kPa) σε διάφορα επίπεδα, με αεριζόμενα ψυχρόμετρα τύπου Assam (τύπος VP1, Delta-T Devices, Cambridge, UK). η ακτινοβολία πάνω ( $G$ ,  $W m^{-2}$ ) και κάτω ( $G$ ,  $W m^{-2}$ ) από την καλλιέργεια με πυρανόμετρα (τύπος CM-6B, Kipp and Zonen, Delft, the Netherlands).
- ✓ η ταχύτητα του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου ( $u_i$ ,  $m s^{-1}$ ) με δισδιάστατο ηχητικό ανεμόμετρο (WindSonic, Gill Instruments Ltd, UK). Το ανεμόμετρο είχε τη δυνατότητα καταγραφής των δυο συνιστωσών της ταχύτητας του αέρα ( $U$  και  $V$ ) από τις οποίες υπολογιζόταν η συνισταμένη ταχύτητα  $u_i$ . Είχε δυνατότητα μέτρησης από 0 έως  $30 m s^{-1}$  με διακριτότητα μέτρησης  $0.01 m s^{-1}$ . Το ανεμόμετρο ήταν τοποθετημένο στο μέσο του θερμοκηπίου και το ύψος του από την επιφάνεια του εδάφους μεταβαλλόταν ανάλογα με τις συνθήκες των πειραμάτων.
- ✓ η θερμοκρασία 4 φύλλων ( $T_l$ , °C) με θερμοζεύγη χαλκού-κονσταντάνης (τύπος T, Omega, UK), διαμέτρου 0.1 mm, τα οποία προσαρμοζόταν στην

κεντρική νεύρωση των φύλλων σε φυτά στο κέντρο του θερμοκηπίου. Η μέση τιμή της θερμοκρασίας της καλλιέργειας ( $T_c$ , °C) υπολογιζόταν από τις μέσες τιμές της θερμοκρασίας των φύλλων. Για να μετρηθεί η αεροδυναμική αγωγιμότητα τοποθετήσαμε τα φύλλα στην κάτω επιφάνεια της καλλιέργειας, μέσα στην καλλιέργεια και πάνω από την καλλιέργεια.

- ✓ η διαπνοή της καλλιέργειας με διάταξη λυσιμέτρου, τοποθετημένου στο κέντρο του θερμοκηπίου. Η συσκευή αποτελούνταν από μια ηλεκτρονική ζυγαριά, με δίσκο που περιελάμβανε δυο (2) φυτά. Παράλληλα υπήρχε ανεξάρτητο σύστημα τροφοδοσίας και στράγγισης του θρεπτικού διαλύματος. Έτσι, καθώς η εξάτμιση από το υπόστρωμα ήταν μηδενική, η απώλεια βάρους που καταγραφόταν στη ζυγαριά ισοδυναμούσε με τη διαπνοή των φυτών.

Για τη συλλογή, την αρχική επεξεργασία και την καταγραφή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε σύστημα συλλογής και καταγραφής δεδομένων (DL 3000, Delta-T Devices, Cambridge, UK). Οι μετρήσεις που αφορούσαν στην ταχύτητα του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου καθώς και στη θερμοκρασία των φύλλων της καλλιέργειας λαμβάνονταν κάθε 1 δευτερόλεπτο (1 s) και καταγραφόταν η μέση τιμή τους κάθε 1 λεπτό (1 m). Όλες οι υπόλοιπες μετρήσεις λαμβάνονταν κάθε 30 δευτερόλεπτα (30 s) και καταγραφόταν η μέση τιμή τους κάθε 10 λεπτά (10 m).



*Εικόνα 3.8 Όργανο μετρήσεως της ταχύτητας του ανέμου μέσα στο θερμοκήπιο*

## **Κεφάλαιο 4 Αποτελέσματα και Συζήτηση**

#### 4.1 Συσχέτιση της ταχύτητας του ανέμου μέσα και έξω από το θερμοκήπιο

Η ταχύτητα του ανέμου μέσα στο θερμοκήπιο μετρήθηκε με δισδιάστατο ηχητικό ανεμόμετρο ενώ έξω από το θερμοκήπιο με ανεμόμετρο κυπέλλων. Κατά την περίοδο που εξετάζετε στη συνέχεια τα παράθυρα στο θερμοκήπιο ήταν συνεχώς ανοιχτά. Το ανεμόμετρο βρισκόταν σε απόσταση 15 cm κάτω από τις κορυφές της καλλιέργειας.

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η σχέση των μετρημένων τιμών της ταχύτητας του ανέμου μέσα ( $u_i$ ) και της ταχύτητας του ανέμου έξω ( $u_o$ ) από το θερμοκήπιο (μέσες τιμές ανά 20 λεπτά) για τις 19 και 20 Μαΐου. Η σχέση που βρέθηκε μεταξύ των τιμών της ταχύτητας του αέρα μέσα και έξω από το θερμοκήπιο είναι:

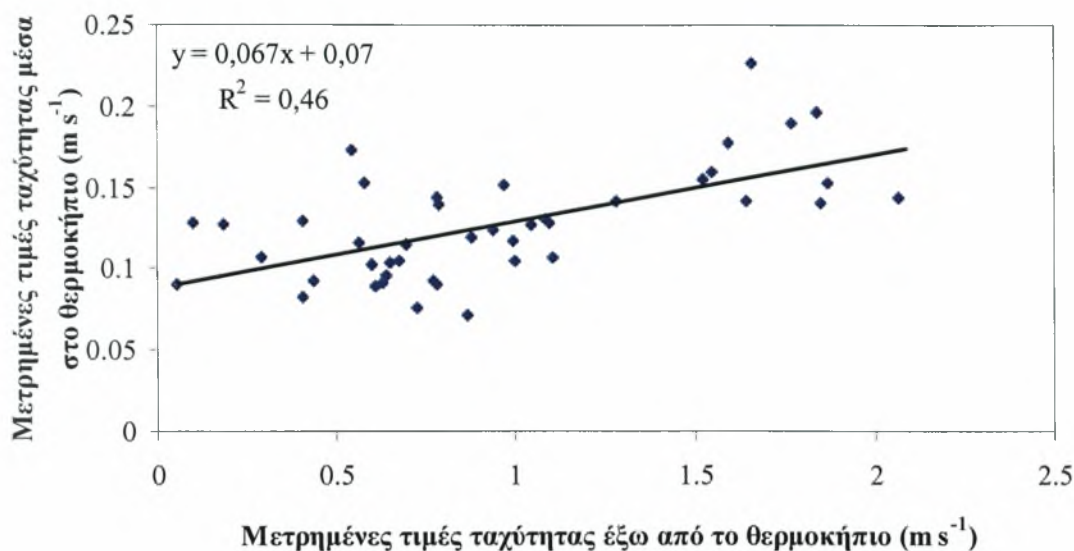
$$u_i = 0.067 u_o + 0.07 \quad (4.1)$$

με τιμή για το συντελεστή προσδιορισμού  $R^2 = 0.46$ .

Οι Katsoulas et al. (2006) από μετρήσεις που έκαναν σε ένα γυάλινο αμφίρρικτο θερμοκήπιο με καλλιέργεια τριανταφυλλιάς, βρήκαν ότι η σχέση που συνδέει την ταχύτητα του ανέμου μέσα και έξω από το θερμοκήπιο είναι η εξής:

$$u_i = 0.061 u_o + 0.01 \quad (4.2)$$

με τιμή για το συντελεστή προσδιορισμού  $R^2 = 0.75$ . Επίσης οι Wang et al., με μετρήσεις σε ένα διπλό τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο, βρήκαν παρόμοιες σχέσεις με τους Katsoulas et al. (2006) και με αυτές που βρέθηκαν στην εργασία αυτή μεταξύ των ταχυτήτων του αέρα μέσα και έξω από το θερμοκήπιο.



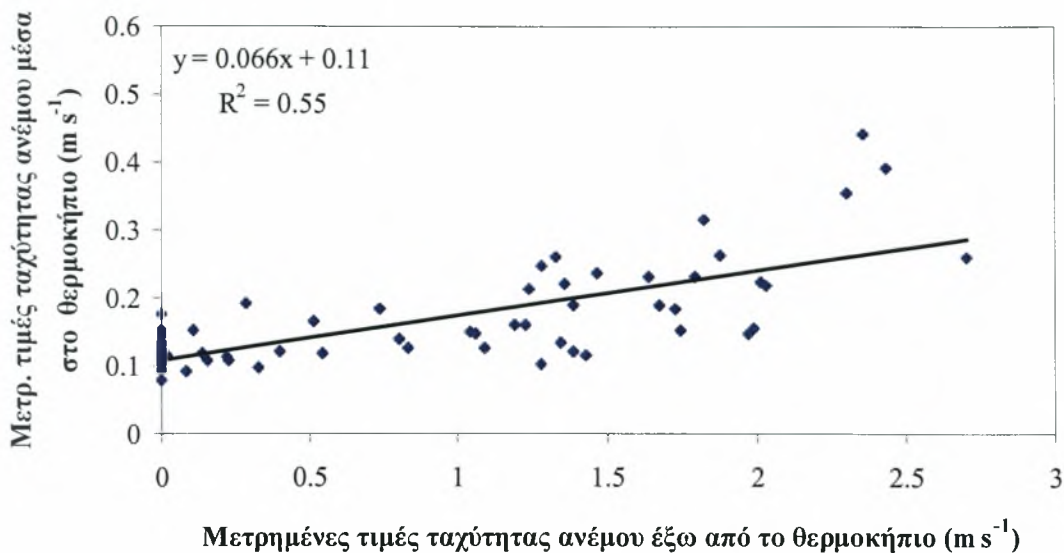
**Σχήμα 4.1** Σχέση μεταξύ των μετρημένων τιμών της ταχύτητας του ανέμου μέσα ( $u_i$ ) και έξω ( $u_o$ ) από το θερμοκήπιο

Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται η σχέση που προκύπτει από τη σύγκριση των ταχυτήτων μέσα και έξω από το θερμοκήπιο δύο άλλες ημέρες (3 και 4 Ιουνίου) του πειράματος κατά τις οποίες το ανεμόμετρο και τα φύλλα βρισκόταν κάτω από τις κορυφές της καλλιέργειας. Στην περίπτωση αυτή η εξίσωση που προκύπτει είναι η εξής:

$$u_i = 0.066 u_o + 0.11 \quad (4.3)$$

με τιμή για το συντελεστή προσδιορισμού  $R^2 = 0.55$ . Από τη μελέτη των εξισώσεων που προκύπτουν φαίνεται ότι αυτές είναι παρόμοιες. Επομένως με τις σχέσεις (4.1) και (4.3) και εφόσον επικρατούν παρόμοιες συνθήκες με αυτές που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία, η ταχύτητα του ανέμου στο εσωτερικό του θερμοκηπίου μπορεί να υπολογιστεί από μετρήσεις της ταχύτητας του εξωτερικού ανέμου.



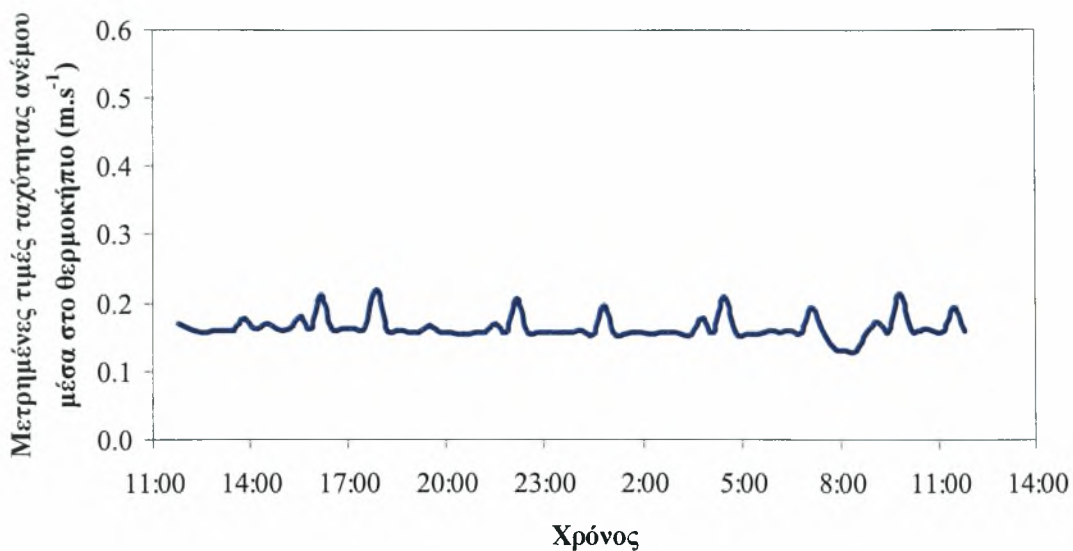


**Σχήμα 4.2** Σχέση μεταξύ των μετρημένων τιμών της ταχύτητας του ανέμου μέσα και έξω από το θερμοκήπιο

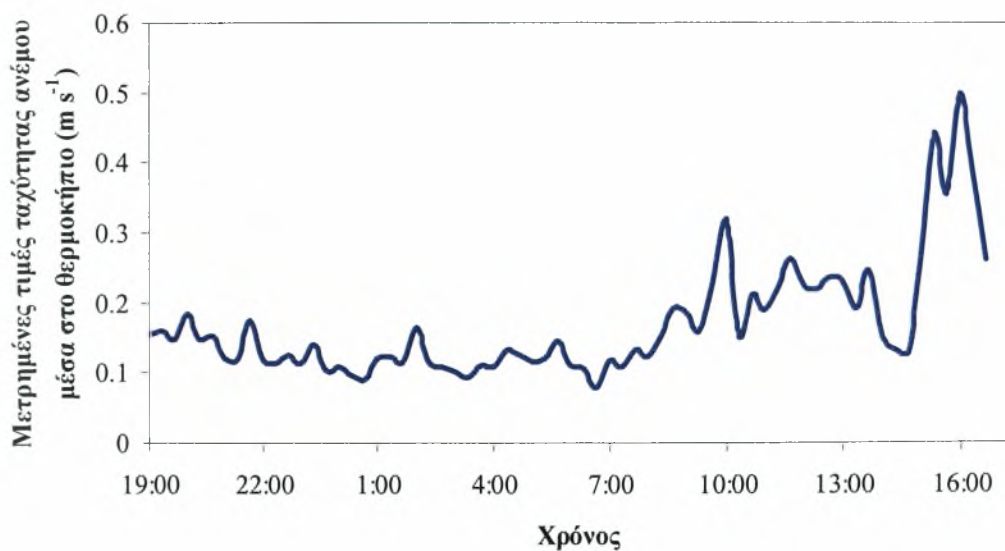
#### 4.2 Πορεία της ταχύτητας του ανέμου κατά τη διάρκεια της ημέρας

Στα Σχήματα 4.3 και 4.4 παρουσιάζεται η πορεία της ταχύτητας του ανέμου μέσα στο θερμοκήπιο, όπως μετρήθηκε με τη βοήθεια του ηχητικού ανεμομέτρου, κατά τη διάρκεια δυο ημερών. Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η ταχύτητα του ανέμου στο εσωτερικό του θερμοκηπίου συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια 20-21 Απριλίου περίοδο, κατά την οποία το θερμοκήπιο θερμαίνονταν και συνεπώς τα παράθυρα του θερμοκηπίου ήταν κλειστά. Φαίνεται ότι η πορεία της ταχύτητας έχει την ίδια διακύμανση καθ όλη τη διάρκεια της ημέρας και δεν έχει μεγάλες αλλαγές στις τιμές της. Παράλληλα όταν λειτουργεί το σύστημα θέρμανσης με αερόθερμο, οι τιμές της ταχύτητας κατά τη διάρκεια της νύχτας είναι μεγαλύτερες.

Από το Σχήμα 4.4 το οποίο αναφέρεται στις 3 και 4 Ιουνίου, παρατηρούμε ότι η ταχύτητα αυξάνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας ενώ τη νύχτα έχει μικρότερες τιμές. Αυτό συμβαίνει διότι κατά τη διάρκεια της ημέρας ανοίγουν τα παράθυρα και έτσι η ταχύτητα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου αυξάνεται και είναι ανάλογη της ταχύτητας του εξωτερικού ανέμου.



*Σχήμα 4.3 Μετρημένες τιμές της ταχύτητας του ανέμου μέσα στο θερμοκήπιο συναρτήσει του χρόνου ( $m s^{-1}$ ) κατά τη διάρκεια περιόδου όπου το θερμοκήπιο παρέμενε κλειστό (20-21 Απριλίου).*

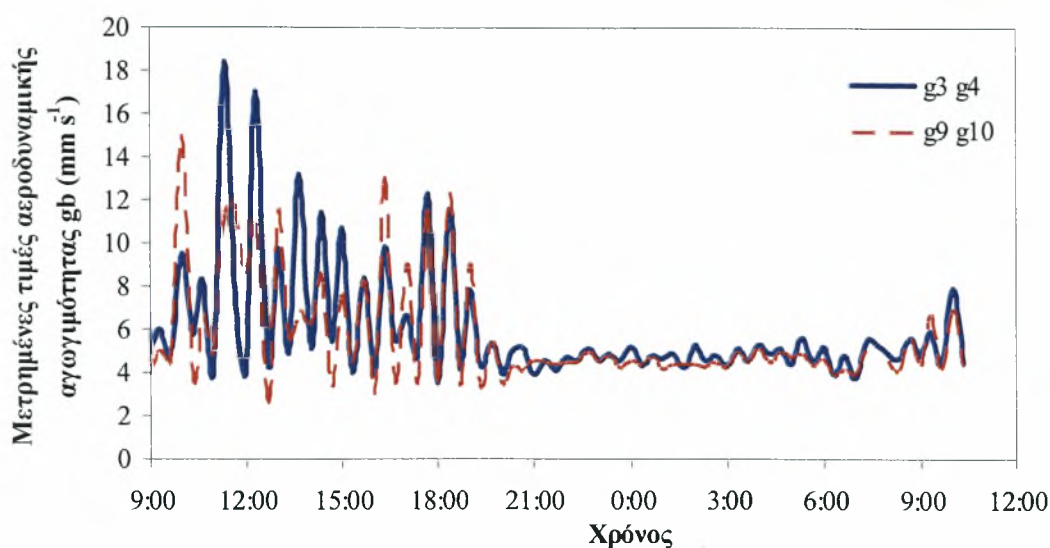


*Σχήμα 4.4 Μετρημένες τιμές της ταχύτητας του ανέμου μέσα στο θερμοκήπιο συναρτήσει του χρόνου ( $m s^{-1}$ ), κατά τη διάρκεια περιόδου όπου το θερμοκήπιο παρέμενε έως στις 7:00 και μετά τα παράθυρα άνοιγαν. (3-4 Ιουνίου)*

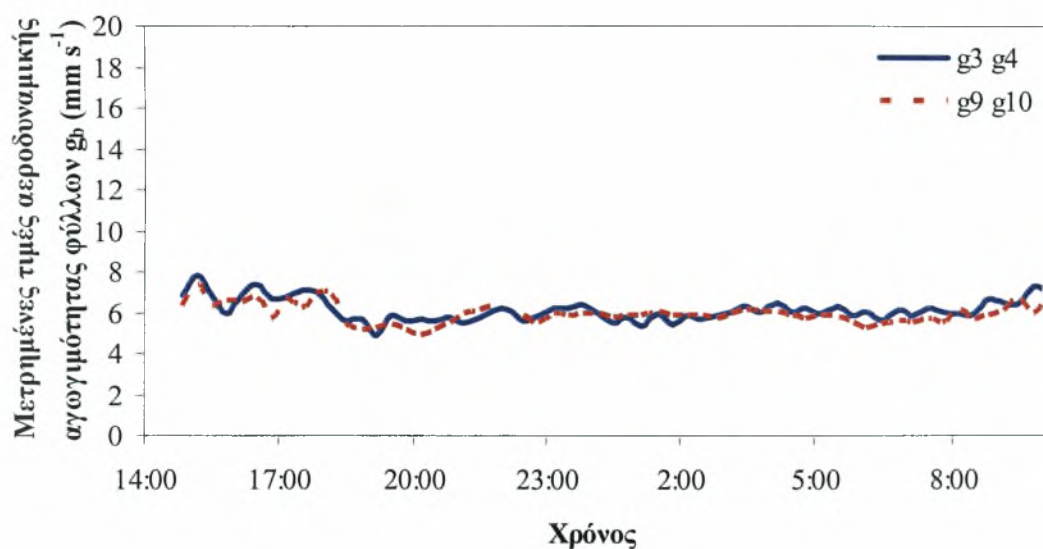
### 4.3 Αεροδυναμική αγωγιμότητα των φύλλων

Στα Σχήματα 4.5 και 4.6 φαίνεται η πορεία των τιμών της αεροδυναμικής αγωγιμότητας  $g_b$  των φύλλων κατά τη διάρκεια δυο περιόδων ημέρας και νύχτας. Στην περίπτωση του Σχήματος 4.5 (12 και 13 Μαΐου) τα φύλλα βρίσκονται στις κορυφές της καλλιέργειας, θέση στην οποία η ταχύτητα του ανέμου στο εσωτερικό του θερμοκηπίου  $u_i$  μεταβάλλεται έντονα και επηρεάζει με αυτόν τον τρόπο την  $g_b$ . Στο Σχήμα 4.5 η  $g_b$  φαίνεται πως δεν έχει μεγάλες διακυμάνσεις και τείνει να αποκτήσει σταθερή τιμή κατά τη διάρκεια της νύχτας, ενώ κατά τη διάρκεια της ημέρας έχει πολλές αλλαγές στις τιμές της. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από τις αλλαγές στις τιμές της  $u_i$ . Στο διάστημα αυτό τα παράθυρα ήταν ανοιχτά σχεδόν όλη την ημέρα επειδή οι θερμοκρασίες που επικρατούσαν ήταν υψηλές. Το γεγονός αυτό δικαιολογεί τις τόσο μεγάλες διακυμάνσεις της αεροδυναμικής αγωγιμότητας. Το βράδυ η θέρμανση λειτούργησε σε δυο χρονικά διαστήματα αλλά δεν φαίνεται να επηρέασε την αεροδυναμική αγωγιμότητα των φύλλων.

Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται η πορεία των τιμών της αεροδυναμικής αγωγιμότητας των φύλλων για τις ημερομηνίες 2 και 3 Ιουνίου. Κατά την περίοδο αυτή τα φύλλα ήταν τοποθετημένα ανά ζεύγη (L3-L4, L9-L10) στο ίδιο ύψος μέσα στην καλλιέργεια. Φαίνεται ότι η αγωγιμότητες βρίσκονται πολύ κοντά λόγω του γεγονότος ότι τα φύλλα είναι σε ίδιες θέσεις κάτω από την καλλιέργεια. Αυτό εξηγεί και τις χαμηλές σχετικά τιμές της  $g_b$ , διότι στη θέση αυτή, μέσα στην καλλιέργεια, οι τιμές της  $u_i$  είναι χαμηλές. Φαίνεται ότι οι τιμές της  $g_b$  οι οποίες προβλέπονται από τα δυο ζευγάρια είναι παρόμοιες και συνεπώς οποιοδήποτε φύλλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της  $g_b$  χωρίς διαφοροποίηση από τα υπόλοιπα.



Σχήμα 4.5 Πορεία αεροδυναμικής αγωγιμότητας κατά το διάστημα 12 και 13 Μαΐου



Σχήμα 4.6 Πορεία αεροδυναμικής αγωγιμότητας κατά το διάστημα 2 και 3 Ιουνίου

#### 4.4 Συσχέτιση της αεροδυναμικής αγωγιμότητας με την ταχύτητα του ανέμου

Η σχέση που βρέθηκε μεταξύ των μετρημένων τιμών της αεροδυναμικής αγωγιμότητας ( $g_b$ ) και της ταχύτητας του ανέμου μέσα στο θερμοκήπιο  $u_i$ , για το

εύρος των τιμών της εργασίας αυτής και για σταθερή διεύθυνση ανέμου παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.7 και δίνεται παρακάτω:

$$g_b = 10.28 u_i + 5.08 \tag{4.4}$$

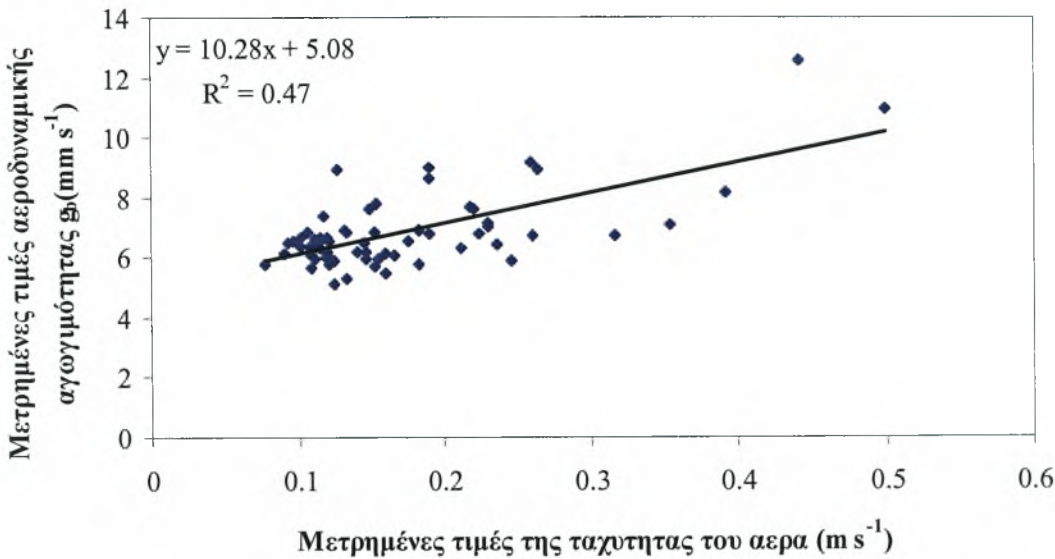
για τις 3 και 4 Ιουνίου, με  $R^2=0,47$ .

Οι Katsoulas et al. (2006) βρήκαν ότι η σχέση που συνδέει την αεροδυναμική αγωγιμότητα και την ταχύτητα του ανέμου μέσα στο θερμοκήπιο είναι:

$$g_b = 12.5 u_i + 1.3 \tag{4.5}$$

με  $R^2=0,74$ .

Από την εξίσωση (4.4), γνωρίζοντας τις τιμές της  $g_b$ , είναι δυνατό να υπολογιστεί η ταχύτητα του ανέμου μέσα στο θερμοκήπιο και συνεπώς, τα τεχνητά φύλλα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση της ταχύτητας του αέρα σε συνθήκες θερμοκηπίου, μέσα στην καλλιέργεια.



Σχήμα 4.7 Αεροδυναμική αγωγιμότητα των φύλλων ( $g_b$ ) συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου μέσα ( $u_i$ ) στο θερμοκήπιο.

#### 4.5 Σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της αεροδυναμικής αγωγιμότητας των φύλλων

Για τον υπολογισμό των τιμών της αεροδυναμικής αγωγιμότητας χρησιμοποιήθηκαν οι κλασικές σχέσεις της μετάδοσης θερμότητας για επίπεδη επιφάνεια.

Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή η  $g_b$  μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$g_b = \kappa Nu/d \quad (4.5)$$

όπου  $\kappa$  ( $s\ m^{-2}$ ) είναι η θερμική διάχυση στον αέρα και  $d$  (m) είναι το χαρακτηριστικό μήκος του φύλλου. Ο αριθμός  $Nu$  εκφράζεται ως συνάρτηση των παρακάτω αδιάστατων αριθμών:

-τον αριθμό Reynolds ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Re = Ud/\nu \quad (4.6)$$

όπου  $U$  η ταχύτητα του αέρα σε ( $m\ s^{-1}$ ) και  $\nu$  το κινηματικό ιξώδες στον αέρα ( $s\ m^{-2}$ ),

-τον αριθμό Grashoff ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση :

$$Gr = \beta g d^3 \Delta T / \nu^2 \quad (4.7)$$

όπου  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $m\ s^{-2}$ ),  $\beta$  ο συντελεστής ογκομετρικής διαστολής του αέρα ( $K^{-1}$ ), και  $\Delta T$  η διάφορα θερμοκρασίας φύλλου και περιβάλλοντος, και τον αριθμό Prandtl :  $Pr = \nu/\kappa$  με τιμή για τον αέρα ίση με 0,705

Για τα τεχνητά φύλλα που μελετήθηκαν βρέθηκε το εύρος της διακύμανσης των τιμών για τον  $Nu$ ,  $Re$  και  $Gr$  ήταν 180 έως 1200, 50 έως 800 και 3500 έως 20000, αντίστοιχα.

Οι Katsoulas et al. (2006) από μετρήσεις που έκαναν σε ένα γυάλινο θερμοκήπιο με καλλιέργεια τριανταφυλλιάς υπολόγισαν ότι οι τιμές των  $Nu$ ,  $Re$  και  $Gr$  ήταν 20 έως 40,  $10^3$  έως  $4\ 10^3$  και  $1\ 10^6$  έως  $3.5\ 10^6$  αντίστοιχα.

Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι σχέσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του αριθμού Nusselt ανάλογα με το καθεστώς μεταφοράς-μετάδοσης της θερμότητας που επικρατεί.



**Πίνακας 4.1.** Παρουσίαση των σχέσεων για τον υπολογισμό του αριθμού του *Nusselt*

Συναγωγή	Σχέση	
Φυσική	$Nu=0.5*Gr^{0.3}$ (1)	Monteith (1980)
Φυσική	$Nu=0.25*Gr^{0.3}$ (2)	Stanghellini (1987)
Μικτή	$Nu=0.37*(Gr+6.92*Re^2)^{0.25}$ (3)	Stanghellini (1987)
Βεβιασμένη	$Nu=0.6*Re^{0.3}$ (4)	Schuepp (1993)

Τέλος, η Stanghellini (1987) πρότεινε την παρακάτω σχέση για τον υπολογισμό της  $g_b$  (m s<sup>-1</sup>)

$$g_b= \frac{d(Tl - Td) + 207\, u^{0.25}}{1174\, \sqrt{d}} \tag{4.8}$$

όπου  $u_i$  :η ταχύτητα του ανέμου μέσα στο θερμοκήπιο (m s<sup>-1</sup>)

d: το χαρακτηριστικό μήκος του φύλλου (m)

Tl: η θερμοκρασία του φύλλου (deg C)

Td: η θερμοκρασία του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο (deg C)

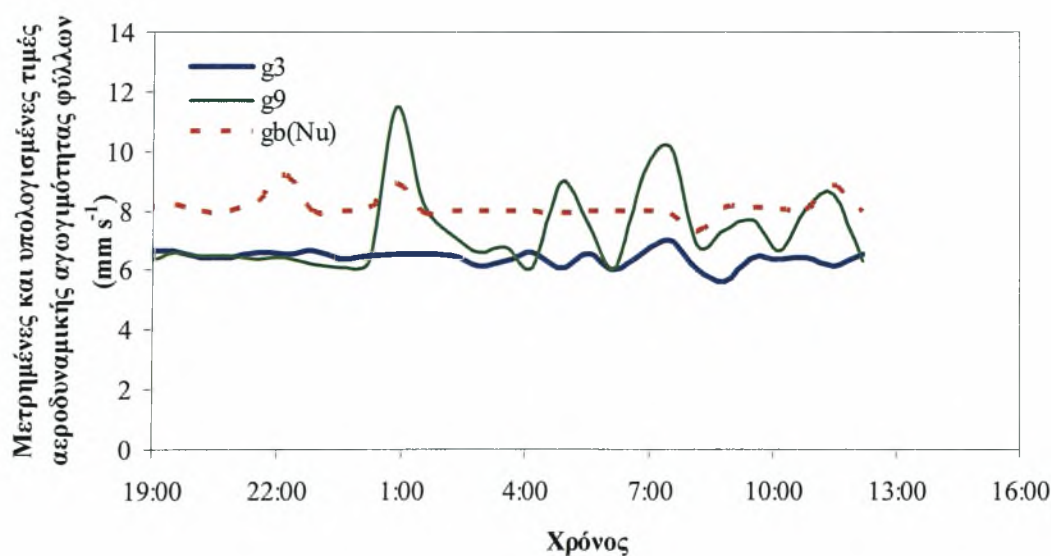
Στο *Σχήμα 4.8* παρουσιάζεται η πορεία της αεροδυναμικής αγωγιμότητας των φύλλων όταν αυτά και το ανεμόμετρο ήταν τοποθετημένο στο μέσο της καλλιέργειας (20-21 Απριλίου). Τα φύλλα L3-L4 είναι καλυμμένα από την καλλιέργεια ενώ τα L9-L10 δεν καλύπτονταν. Τη στιγμή που το σύστημα θέρμανση τίθεται σε λειτουργία παρατηρούμε ότι στο φύλλο L9 που δεν καλύπτεται, αυξάνεται η αεροδυναμική αγωγιμότητα καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή γύρω από αυτό, λόγω της χρήσης του αερόθερμου για θέρμανση. Η τιμή της  $g_b$  που μετρήθηκε από το φύλλο L3 αυξάνεται πολύ λίγο αφού δεν επηρεάζεται έντονα από τις μεταβολές της  $u_i$ , εφόσον είναι μέσα στην καλλιέργεια.

Στα *Σχήματα 4.9* και *4.10* παρουσιάζονται οι μετρημένες και υπολογισμένες τιμές της αεροδυναμικής αγωγιμότητας του φύλλου 3 και κατά συνέπεια και των υπόλοιπων φύλλων, εφόσον βρίσκονται στην ίδια θέση. Οι περιπτώσεις αυτές αναφέρονται στις ημερομηνίες 12-13 Μαΐου και 3-4 Ιουνίου αντίστοιχα. Οι μετρημένες τιμές της αγωγιμότητας συγκρίνονται με τις αγωγιμότητες που υπολογίζονται από τις σχέσεις (4.8) και (4.5) με την τιμή του Nu να υπολογίζεται από

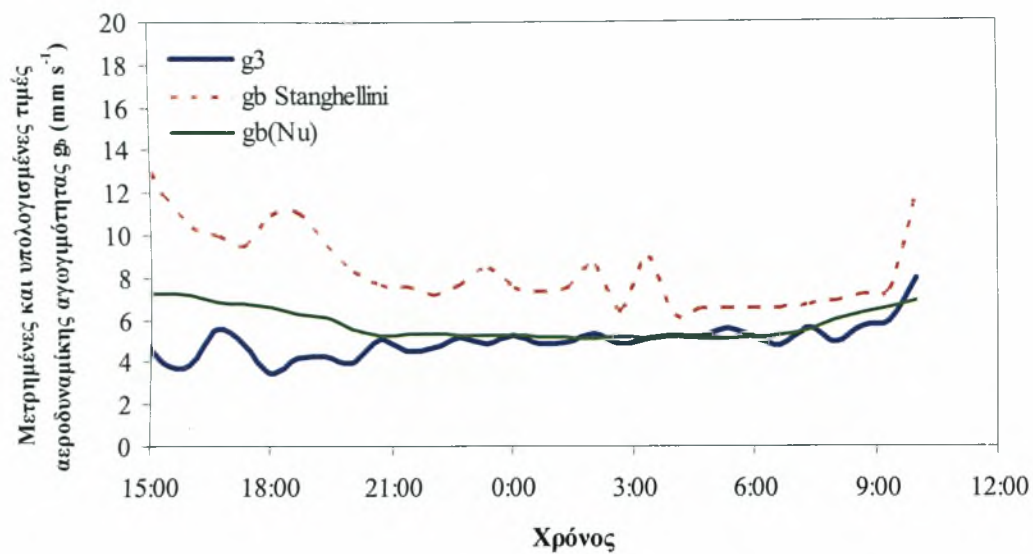
τη σχέση (1) του πίνακα (4.1) για φυσική μεταφορά θερμότητας. Παράλληλα, υπολογίστηκαν οι τιμές της  $g_b$  όπως προτάθηκε από τον Monteith (1973) αλλά δεν υπήρξε καλή προσέγγιση με τις μετρημένες τιμές της  $g_b$  της παρούσης εργασίας.

Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζεται η σύγκριση των υπολογισμένων και μετρημένων τιμών για την περίπτωση κατά την οποία τα φύλλα και το ανεμόμετρο είναι στις κορυφές της καλλιέργειας. Οι μετρημένες τιμές βρίσκονται πολύ πιο χαμηλά από τις υπολογισμένες, από τις σχέσεις (4.5) και (4.8) μέχρι να αρχίσει να λειτουργεί η θέρμανση. Από τη στιγμή που η θέρμανση αρχίζει να λειτουργεί, οι υπολογισμένες και μετρημένες τιμές είναι παρόμοιες. Οι μικρές τιμές της ταχύτητας του ανέμου που επικρατούν κατά τις περιόδους χωρίς θέρμανση οδηγούν σε φαινόμενα φυσικής συναγωγής και κατά συνέπεια η σχέση (3) (πίνακας 4.1), η οποία έχει προταθεί για περιπτώσεις μικτής συναγωγής δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί καθώς υπερεκτιμά τις τιμές  $g_b$ .

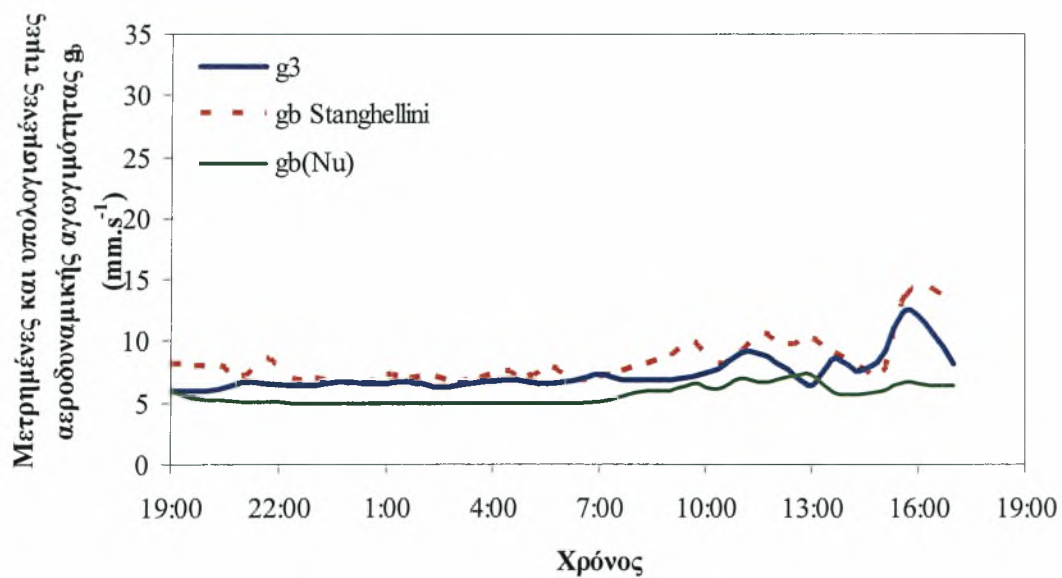
Είναι φανερό λοιπόν ότι υπάρχει καλή προσέγγιση στο Σχήμα 4.10 μεταξύ των υπολογισμένων και μετρημένων τιμών. Οι μετρημένες τιμές βρίσκονται ανάμεσα σε φυσική και μικτή μεταφορά θερμότητας. Άρα ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν οι τιμές συμπίπτουν με το φαινόμενο φυσικής ή μικτής συναγωγής.



**Σχήμα 4.8** Σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών αεροδυναμικής αγωγιμότητας του φύλλου για περιόδους με φυσική και μικτή συναγωγή.



*Σχήμα 4.9 Σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών αεροδυναμικής αγωγιμότητας του φύλλου*



*Σχήμα 4.10 Σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών αεροδυναμικής αγωγιμότητας του φύλλου*

4.6 Σύγκριση μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της διαπνοής κατά τη διάρκεια της ημέρας

Η πορεία της διαπνοής κατά τη διάρκεια μιας ημέρας (3 Ιουνίου), όπως υπολογίστηκε τόσο από τη σχέση (2.14) των Penman-Monteith όσο και από τις μετρήσεις που έγιναν με τη βοήθεια του λυσιμέτρου, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.11. Για τον υπολογισμό της διαπνοής χρησιμοποιήθηκαν τιμές της στοματικής και της αεροδυναμικής αγωγιμότητας. Η αεροδυναμική αγωγιμότητα ήταν μετρημένη ενώ η στοματική αγωγιμότητα υπολογίστηκε από τη σχέση (Παπαδάκης, 1989):

$$g_s=\frac{1}{f_f(R_{n,\phi}).f_f(T_\phi).f_f(e^*_\phi-e_a)} \tag{4.9}$$

όπου οι συναρτήσεις  $f_j(R_{n,\phi})$ ,  $f_j(T_\phi)$  και  $f_j(e^*_\phi-e_a)$  της παραπάνω σχέσης: έχουν τη μορφή:

$$f_j(R_{n,\phi}) = 1/(C_1+C_2 R_{n,\phi})$$

$$f_j(T_\phi) = ( C_3-C_4) T_\phi^2$$

$$f_j(e^*_\phi-e_a) = C_5^{(e^*_\phi-e_a)}$$

Οι τιμές των συντελεστών  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$  και  $C_5$  της σχέσης (4.9) παρουσιάζονται στον πίνακα (4.2) (Παπαδάκης, 1989)

***Πίνακας 4.2** Τιμές των συντελεστών  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$  και  $C_5$  της σχέσης (4.9) για τον υπολογισμό της εσωτερικής αντίστασηςφυτών τομάτας (Tombo),  $R_{n,\phi}$  σε  $Wm^{-2}$ ,  $T_\phi$  σε  $^{\circ}C$ ,  $e^*_\phi-e_a$  σε  $kPa$*

	$R_{n,\phi} \geq 0$	$R_{n,\phi} < 0$
$C_1$	111.7	
$C_2$	36.7	
$C_3$	387.6	20.4
$C_4$	8.7	1.2
$C_5$	1.4	1.3

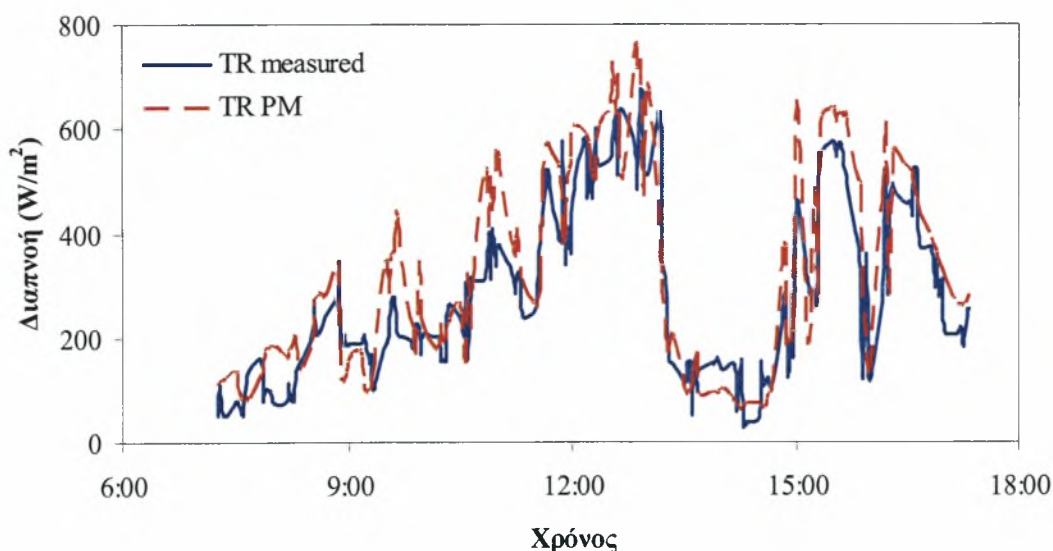
Η αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας έχει υπολογιστεί από τη σχέση:

$$g_a= 2 LAI g_b \tag{4.10}$$

όπου  $g_b$  είναι η μετρημένη αεροδυναμική αγωγιμότητα του φύλλου.

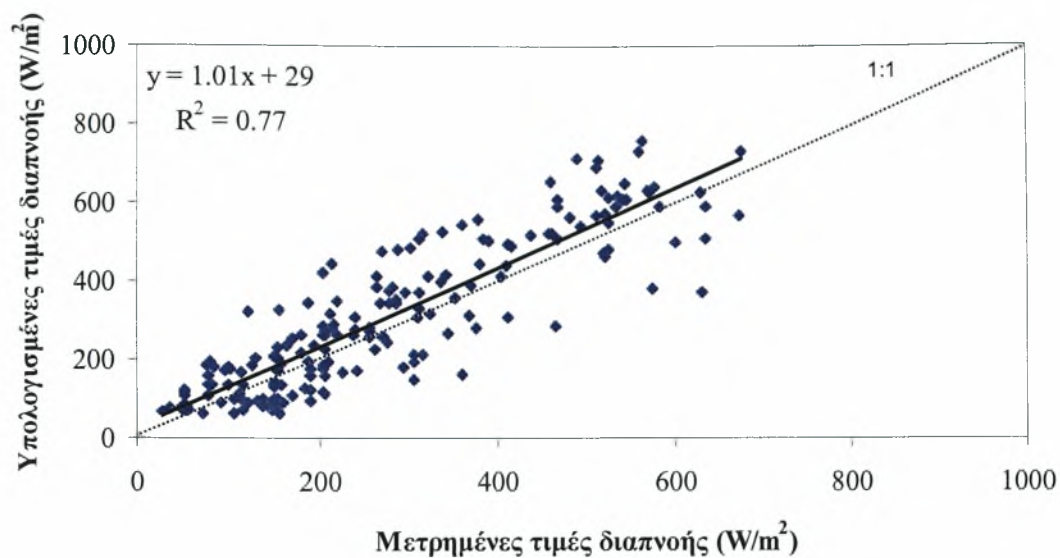
Από το Σχήμα 4.11 φαίνεται ότι οι μετρημένες τιμές της διαπνοής και οι υπολογισμένες τιμές με τη σχέση (2.14) των Penman-Monteith είναι παρόμοιες. Παρόλα αυτά όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.12 φαίνεται ότι οι μετρημένες τιμές της διαπνοής είναι μικρότερες από της υπολογισμένες, καθώς η σχέση των Penman-Monteith υπερεκτιμά τις τιμές της διαπνοής. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η  $g_a$  μετρήθηκε όταν τα φύλλα ήταν ψηλά και όχι μέσα στην καλλιέργεια. Επιπλέον για τον υπολογισμό της διαπνοής σύμφωνα με τη σχέση των Penman-Monteith χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές της ηλιακής και όχι της καθαρής ακτινοβολίας.

Στο Σχήμα 4.13 παρουσιάζονται οι πορεία της αεροδυναμικής και στοματικής αγωγιμότητας. Η αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας υπολογίστηκε από τη σχέση (4.10) και η φυλλική επιφάνεια της καλλιέργειας ήταν ίση με 2. Από το σχήμα φαίνεται ότι η στοματική αγωγιμότητα βρίσκεται πιο χαμηλά από την αεροδυναμική. Επομένως η στοματική αγωγιμότητα ελέγχει τη διαπνοή και η αεροδυναμική αγωγιμότητα δεν είναι περιοριστικός παράγοντας. Αυτό συμβαίνει διότι το θερμοκήπιο είναι καλά αεριζόμενο και ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας είναι μεγάλος. Εάν ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας ήταν ίσος με 1, τότε η αεροδυναμική αγωγιμότητα θα είχε τιμές μικρότερες της στοματικής και στην περίπτωση αυτή, η αεροδυναμική αγωγιμότητα θα έλεγχε την διαπνοή, θα ήταν δηλαδή περιοριστικός παράγοντας.

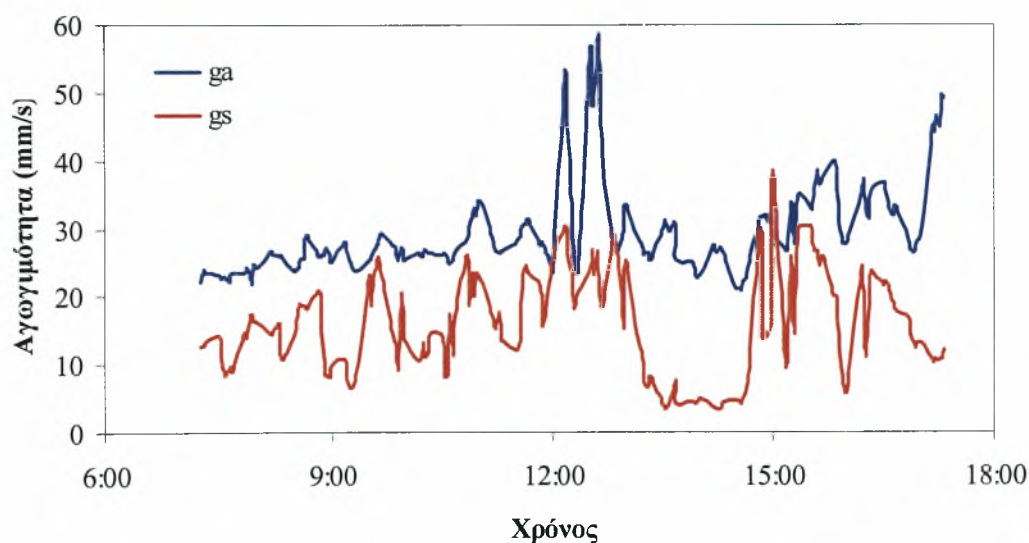


**Σχήμα 4.11** Σύγκριση μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της διαπνοής





**Σχήμα 4.12** Σχέση μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της διαπνοής



**Σχήμα 4.13** Πορεία των υπολογισμένων τιμών της αεροδυναμικής ( $g_a$ ) και στοματικής ( $g_s$ ) αγωγιμότητας.

## **Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα**

## Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία, για συγκεκριμένη διεύθυνση εξωτερικού ανέμου και βρέθηκε μια γραμμική σχέση μεταξύ της ταχύτητας του αέρα μέσα και έξω από το θερμοκήπιο. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνει προηγούμενα αποτελέσματα που αναφέρουν ότι για μεγάλες τιμές της ταχύτητας του ανέμου, τα χαρακτηριστικά της ροής του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο συνδέονται άμεσα με αυτά της ροής του εξωτερικού αέρα. Κατά τον ίδιο τρόπο, οι τιμές της αεροδυναμικής αγωγιμότητας των φύλλων μέσα στο θερμοκήπιο βρέθηκαν να έχουν, για το εύρος των μετρήσεων που παρουσιάστηκαν στην εργασία αυτή, γραμμική σχέση με την ταχύτητα του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο.

Επιπλέον, έγινε φανερό ότι είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε με ακρίβεια την επίδραση του μικροκλίματος και των μεταβολών του στη διαπνοή. Οι μετρημένες τιμές με τη βοήθεια λυσιμέτρου και οι υπολογισμένες τιμές με τη σχέση των Penman-Monteith βρέθηκαν να είναι παρόμοιες. Βρέθηκε ότι ο περιοριστικός παράγοντας της διαπνοής ήταν η στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας καθώς για τις τιμές του δείκτη φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας που μετρήθηκαν ( $LAI=2$ ), η στοματική αγωγιμότητα ήταν μικρότερη της αεροδυναμικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας. Αν η τιμή του  $LAI$  ήταν ίση με 1 τότε περιοριστικός παράγοντας της διαπνοής θα ήταν η αεροδυναμική αγωγιμότητα.

Τέλος, τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην εργασία αυτή επιβεβαιώνουν ότι τα τεχνητά φύλλα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση της ταχύτητας του αέρα σε συνθήκες θερμοκηπίου μέσα στην καλλιέργεια και για την αξιολόγηση των συστημάτων αερισμού των θερμοκηπίων, καθώς δίνουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την αεροδυναμική αγωγιμότητα των φύλλων και την ταχύτητα του ανέμου στο επίπεδο της καλλιέργειας. Παρόλα αυτά, για να χρησιμοποιηθούν στον έλεγχο του μικροκλίματος του θερμοκηπίου σε μεγαλύτερη εμπορική κλίμακα, θα πρέπει πρώτα να τροποποιηθούν και να απλοποιηθούν έτσι ώστε να μπορέσουν να ενσωματωθούν στα συστήματα αυτά.

## **Βιβλιογραφία**

- Alados, I., Alados-Arboledas, L., 1999.** Direct and diffuse photosynthetically active radiation: measurements and modeling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 93: 27-38
- ASHRAE, 1983.** Air conditioning and Heating. In: *ASHRAE Handbook of Fundamentals*, New York: American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineering Inc
- Baille, A., 1996.** Overview of greenhouse climate control in the Mediterranean regions. *Mediterranean Colloquium on Protected Cultivation*, Agadir, Morocco.
- Bouland, T., Baille, A., 1993.** A simple greenhouse control model incorporation effects of aeration and evaporative cooling, *Agricultural and Forest Meteorology*, 65: 145-57
- Bouland, T., Baille, A., 1995.** Modeling of air exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 61(1): 37-48
- Bouland, T., Draoui, B., 1995.** Natural ventilation of greenhouse with continuous roof vents: measurements and data analysis. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 61: 27-36
- Bouland, T., Feuilloley, P., Kittas, C., 1997.** Natural ventilation performance of six greenhouse and tunnel types. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 67: 249-266
- Bunce, J.A., 1985.** Effect of boundary layer conductance on the response of stomata to humidity. *Plant, Cell and Environment*, 8: 55-57
- Collatz, G. J., Ball, J. T., Grivet, C., Berry, J. A., 1991.** Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer. *Agricultural and Forest Meteorology*, :107-136
- Dayan, E., Fuchs, M., Plaut, Z., Presnov. E., Grava, A., Matan, E., Solphoy, A., Mugira, U., Pines, N., 2000.** Cooling of roses in greenhouses. *Acta Horticulturae*, 534: 351-360
- De Graaf, R., van den Ende, J., 1981.** Transpiration and evapotranspiration of greenhouse crops. *Acta Horticulturae*, 119: 147-158

- De Villèle, O., 1972.** Besoins en eau des cultures sous serres – Essai de conduite des arrosages en fonction de l'ensoleillement. *Acta Horticulturae*, 35: 123-135
- Fernandez, J E., Bailey, B. J., 1992.** Measurement and prediction of greenhouse ventilation rates. *Agricultural and Forest Meteorology*, 58, 229-45
- Fernandez-Rodriguez, J E., Fernandez-Vadillos, J., Camacho-Ferre, F., Vazquez, J. J., Kenig, A., 2000.** Radiative field uniformity under shading screens under greenhouse versus whitewash in Spain. *Acta Horticulturae*, 534: 125-130
- Fuchs, M., 1993.** Transpiration and foliage temperature in a greenhouse. In: Fuchs, M., (Editor), *Proceedings of the International Workshop on Cooling Systems for Greenhouses*, Tel Aviv, Israel, 89-98
- Ganzoli. K. V., Blackwell, J., 1973.** The effect of a glasshouse to high solar radiation and ambient temperature. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 18: 205-216
- Karica, M., Short, T H., Stowell, R. P., 1998.** A CFD evaluation of naturally ventilated multi-span, sawtooth greenhouses. *Transactions of the ASAE*, 41(3):833-836
- Karlsson M. G., Gerberick J. O., Hackmann M. E., 1991.** Temperature driven leaf unfolding rate in *Hibiscus rosa-sinensis*. *Scientia Horticulturae*, 45: 323-331
- Kittas, C., Baille, A., Giaglaras, P., 1999a.** Influence of covering material shading on the spectral distribution of light in greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 65: 37-49
- Kittas, C., Bouland, T., Mermier, M., Papadakis, G., 1996.** Wind induced air exchange rates in a greenhouse tunnel with continuous side openings. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 73: 341-351
- Kittas, C., Draoui, B., Bouland, T., 1995.** Quantification du taux d'aération d'une serre à ouvrant continu entoilure *Agricultural and Forest Meteorology*, 69, 265-277
- Katsoulas, N., Kittas, C., Baille A., 2006.** Use of artificial leaves for monitoring aerodynamic conductance in greenhouses. *Acta Horticulturae*, 691(2): 749-756
- Landberg, J. J., White, B., Thorpe, M. R., 1979.** Computer analysis of the efficiency of evaporative cooling for glasshouse in high energy environment. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 24: 29-39
- Monteith, J. L., 1973.** *Principles of environmental Physics*. Contemporary Biology, Edward Arnold, London UK, 241 pp

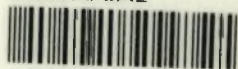


- Monteith, J. L., 1995.** A reinterpretation of stomatal responses to humidity. *Plant, Cell and Environment*, 18: 357-364
- Montero, J. L., Antón, A., 1994.** Greenhouse cooling during warm periods. *Acta Horticulturae*, 357: 49-61
- Morris, L. G., Neale, F. E., Postlethwaite, J. D., 1957.** The transpiration of glasshouse crops and its relationship to the incoming solar radiation. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2(2): 111-122
- Penman, H. L., 1948.** Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society, London, A*, 193: 120-145
- Seginer, I., 1984.** On the night transpiration of greenhouse roses under glass or plastic cover. *Agricultural and Forest Meteorology*, 30: 257-68
- Stanghellini, C., 1987.** Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management. *PhD Thesis*, Agricultural University of Wageningen, The Netherlands, 150 pp
- Van de Post, C. J., van Schie, J. J., de Graaf, R., 1974.** Energy balance and water supply in greenhouses in the West-Netherlands. *Acta Horticulturae*, 35: 13-22
- Wang, S. Bouland, T and Haxaire, R. 1999.** Air speed profiles in a naturally ventilated greenhouse with a tomato crop. *Agric. For. Meteorol.*, 96(4): 181-188
- Yang, X., 1995.** Comments on 'Thermal and aerodynamic conditions in greenhouses in relation to estimation of heat flux and evapotranspiration'. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77: 131-136
- Yang, X., Short, T. H., Robert, D. F., Bauerle, W. L., 1990.** Transpiration, leaf temperature and stomatal resistance of a cucumber crop. *Agricultural and Forest Meteorology*, 51: 197-209
- Κατσούλας Ν., 2002.** Επίδραση των παραγόντων του περιβάλλοντος στη διαπνοή τριανταφυλλιάς υπό κάλυψη. *Διδακτορική Διατριβή*, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας 220 pp
- Κατσούλας Ν., Λύκας, Χ., Γιαγλάρας, Π., Κίττας, κ., 2000.** Διαχείριση θρεπτικού Διαλύματος σε κλειστό υδροπονικό σύστημα με καλλιέργεια τριανταφυλλιάς στη Μαγνησία. *Γεωργία και Κτηνοτροφία*, 6: 42-50
- Κίττας, Κ., 2000.** Γεωργικές Κατασκευές & Έλεγχος Περιβάλλοντος Μονάδων Φυτικής Και Ζωικής Παραγωγής. Ι Θερμοκήπια. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος, pp 2-22, 67-92

- Θερμοκήπια '96.** Αφιέρωμα στα θερμοκήπια. Εκδόσεις Γεωργική Τεχνολογία. pp 96-99
- Κίττας, Κ., Γ. Παπαδάκης & Θ. Μπαρτζάνας, Νοέμβριος, 1999.** Ψύξη Θερμοκηπίων. Γεωργία Κτηνοτροφία, τεύχος 9, Αφιέρωμα Θερμοκήπια. pp 90-99
- Μπαρτζάνας Θ., 2004.** Διαχείριση της υψηλής υγραμετρίας σε ελληνικά Θερμοκήπια. *Διδακτορική Διατριβή*, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας 256 pp
- Παπαδάκης, Γ., 1989.** Πειραματική ανάλυση και δυναμική προσομοίωση του μικροκλίματος στο θερμοκήπιο. *Διδακτορική Διατριβή*, Γεωργικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 166 pp



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000085707